Série Bricolage

Les capteurs solaires à air

Réaliser – Installer – Gérer

Guy Isabel

EYROLLES

Les capteurs solaires à air

Réaliser – Installer – Gérer

Guy Isabel

EYROLLES

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Crédits

Toutes les photos et illustrations sont de l'auteur sauf :
p. 10 : Jürgen Fälchle – Fotolia.com
p. 18 : Delphimages – Fotolia.com
p. 20 : burak duman – Fotolia.com (haut) ; Brad Pict – Fotolia.com (bas)
p. 36 : H.-B. de Saussure d'après un portrait de St Ours
p. 37 : Joseph Fourier par Julien Léopold Bailly

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.
© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-13403-2

En mémoire de Jean-Luc Perrier, enseignant angevin, visionnaire du solaire, infatigable et génial constructeur, précurseur trop tôt disparu, mais dont l'exemple nous motive encore aujourd'hui…

Un grand merci aux entreprises ou personnes suivantes qui ont activement contribué à la réalisation de nos panneaux à air chaud ou à leur mise en service :

- Absorbeurs en ardoises : Ardoisières d'Angers (M. Vitour).
- Vitrages en verre trempé : Société Glassgo Cholet.
- Composants électroniques : Société Lextronic (M. Braun).
- Cadre en sapin Douglas : Scierie Rétif, Maine et Loire.
- Logiciel solaire : Ptaff.ca, M. Miguel Tremblay.

SOMMAIRE

Avant-propos 11
L'eau 13
Le vent 14
Le soleil 14

PARTIE 1
INTRODUCTION À L'ÉNERGIE SOLAIRE 19

Le soleil, ses croyances, ses inventeurs 20
Les croyances 20
Les inventeurs 21

Le soleil et la Terre 24

L'énergie solaire 31
Constitution de l'atmosphère 31

L'aérothermie solaire 35
Un peu d'histoire… 35
Quelques expérimentations 37
Première expérience : découvrir le coefficient d'absorption 38
Deuxième expérience : limiter les pertes thermiques 38
Troisième expérience : tester l'effet de serre 39
Quatrième expérience : choisir un matériau absorbeur naturel 39
Du corps noir à l'absorbeur 42
Soleil et vitrage 44
L'air, fluide caloporteur 48
Orienter le capteur 49

PARTIE 2

RÉALISATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE À AIR 53

Construire un capteur à air 54

Le cadre du capteur 56

1. Préparation du bois 56

2. Assemblage du cadre 59

3. Équipement, finition du cadre 62

4. Fixations du cadre et conduits 64

Préparation des ouvertures 65

Mise en place et aménagements intérieurs 69

Chicanes et ardoises 72

Vitrage du capteur 75

La gestion estivale 79

Se protéger du soleil 79

Construire une protection solaire 81

Complément : l'albédo 84

Rafraîchissement estival 85

Les options électroniques 86

Solarimètre numérique 86

Principe du montage 87

Régulation de vitesse PWM 90

Principe du montage 91

Analyse du schéma électronique 92

Trappe automatisée 95

Réalisation mécanique 96

Module de commande électronique 98

Centrale à microcontrôleur 103

La programmation 108

À propos d'une alimentation photovoltaïque… 110
Le panneau solaire 110
La batterie 110
Le régulateur de charge solaire 110

PARTIE 3
ANNEXES 113

Les bonnes adresses 114
Les liens utiles 114
Les fournisseurs de matériels… 115

Bibliographie 116

Index 117

AVANT-PROPOS

Nul n'ignore plus, de nos jours, que la surexploitation des ressources fossiles de notre planète, ajoutée à la hausse constante de la démographie, laisse entrevoir à plus ou moins brève échéance une crise énergétique majeure. Pour ne rien arranger, des changements climatiques dus aux émissions de gaz à effet de serre (GES), des pollutions diverses, des déchets nucléaires dont on ne sait que faire, appellent à une réorganisation radicale et urgente de la filière énergétique mondiale.

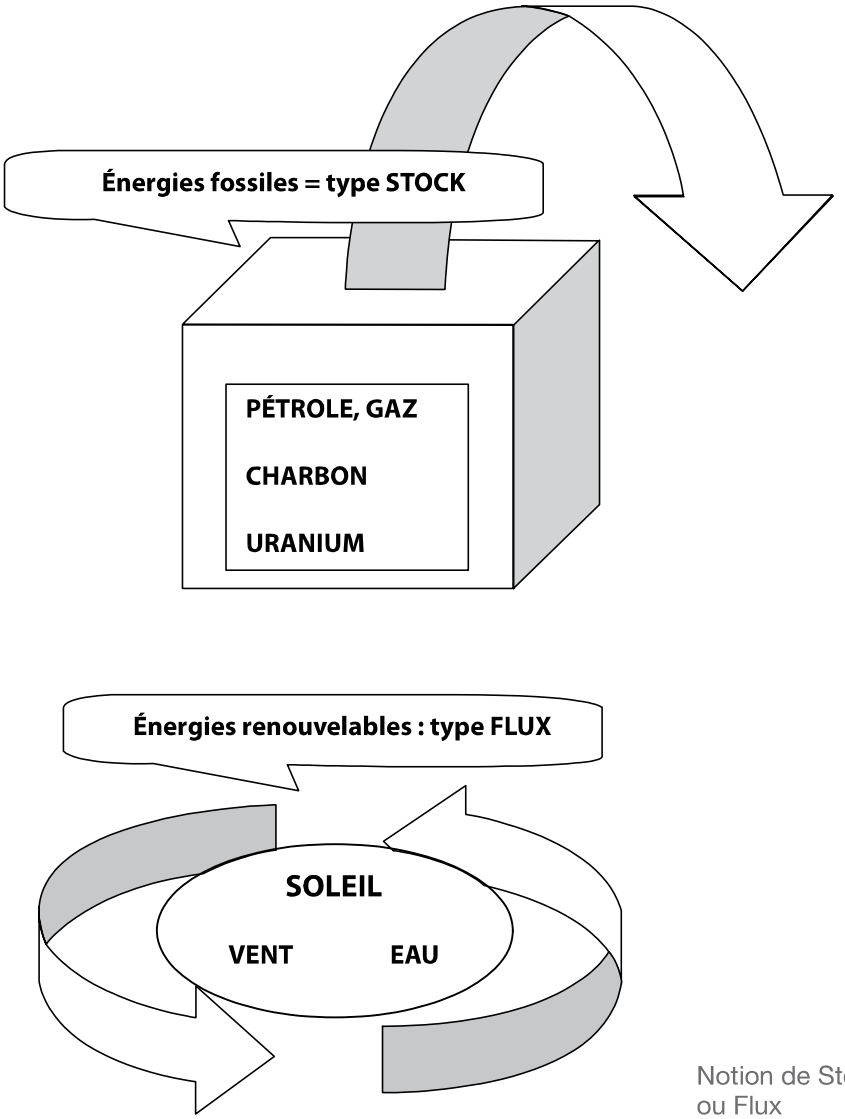
L'Environnement est devenu une priorité, une obsession même, et les scientifiques, politiques, et responsables mondiaux de tout genre cherchent à instaurer par leur réflexion un ordre nouveau dans ce domaine. Rappelons-nous des différents Sommets de la Terre, de 1972 à Stockholm, en passant par Kyoto, Rio à nouveau en 2012. Dans notre quotidien déjà, les pollueurs seront les payeurs : bonus-malus à propos des véhicules neufs, campagnes de sensibilisation pour le tri et la gestion des déchets (puce électronique dans la poubelle pour une incitation financière personnalisée). Toute une panoplie d'aides et de crédits d'impôts pour des économies d'énergie réelles : prêts à taux zéro, classes énergétiques du gros électroménager (A, A+) Haute qualité environnementale pour les constructions neuves (HQE), bilan et taxe carbone, notions de négawatts… L'énergie la moins polluante étant bien celle que l'on ne consomme pas, nous nous faisons les témoins, ces dernières années de diverses campagnes d'économies d'énergie, d'une véritable chasse au gaspillage énergétique...
On a pu constater la suppression progressive des lampes à incandescence, à commencer par les plus puissantes au profit des lampes dites à économie d'énergie (les lampes fluocompactes, dont le recyclage doit être organisé), et le choix de plus en plus important de lampes à leds qui offrent une consommation encore plus réduite et une durée de vie très importante.
Jamais sans doute dans son Histoire, l'Homme n'a ressenti aussi fortement le besoin impératif de changer les habitudes du passé. Déjà, Augustin Mouchot, un inventeur français d'applications solaires entrevoyait l'épuisement des énergies fossiles : « Si dans nos climats, l'industrie peut se passer de l'emploi direct de la chaleur solaire, il

arrivera nécessairement un jour, où, faute de combustible, elle sera bien forcée de revenir au travail des agents naturels. Que les dépôts de houille et de pétrole fournissent longtemps encore leur énorme puissance calorifique, nous n'en doutons pas. Mais les dépôts s'épuisent sans aucun doute… pourquoi n'en serait-il pas de même un jour d'une provision de combustible où l'on puise si largement sans jamais combler les vides qui s'y forment ? On ne peut s'empêcher de conclure qu'il est prudent et sage de ne pas s'endormir à cet égard sur une sécurité trompeuse. »

C'était en 1869 !

Une clairvoyance restée lettre morte pourtant par l'industrie du siècle dernier.

Et si les énergies renouvelables représentaient **la** solution à la crise énergétique ? Elles sont quasiment inépuisables et gratuites, quoique variables selon les latitudes et les saisons. Elles sont, bien entendu, non polluantes dans leur exploitation, et généralement présentes en tous points du globe, évitant des conflits liés à leur approvisionnement.



Notion de Stock ou Flux

Elles sont de nos jours largement sous-exploitées. Pourtant, ces solutions écologiquement intéressantes devront s'intégrer dans une démarche qui privilégie l'humain pour accomplir une révolution sociale autant que technologique.
Jetons un rapide coup d'œil sur ces énergies de l'avenir, que nous offre la Nature depuis toujours, et qui s'intègrent si parfaitement dans le terme de développement durable, que nous pourrions traduire également par « énergies qui assurent les besoins des générations actuelles, sans compromettre ceux des générations à venir ».
Si les énergies fossiles sont plutôt des énergies de type **Stock** (charbon, pétrole, gaz, uranium), donc amenées à s'épuiser on pourra qualifier les énergies renouvelables d'énergies de type **Flux**, qui se renouvellent en permanence au fil des jours, des saisons ou de cycles bien définis. Elles émanent du soleil, de l'eau, du vent ou encore de la biomasse. Pas ou peu de pollution donc, et l'utilisation du bois comme combustible dans le cadre d'une exploitation raisonnée du patrimoine forestier permet d'affirmer que, dans ce cas, les émissions de CO_2 sont considérées comme neutres, si l'on tient compte du carbone réutilisé lors de la croissance des arbres. Biomasse et géothermie ne sauraient se passer totalement de systèmes électriques, et nous semblent donc peu enclins à mériter entièrement l'appellation renouvelable.

L'eau

L'énergie hydraulique produit depuis fort longtemps déjà de l'électricité à partir de l'énergie cinétique. Au fil de l'eau pour des fleuves avec un débit important ou moyennant un barrage ; avec des volumes artificiels de retenue constituant des réserves potentielles en cas de besoin immédiat. Notons que l'eau peut être « remontée » par pompage aux heures ou périodes de faible consommation, puis être turbinée à la demande (c'est bien là une façon astucieuse de stocker l'énergie électrique). L'usine marémotrice de la Rance dans la baie du Mont St Michel exploite depuis 1967 la puissance hydraulique des marées à fort coefficient, dans un sens, puis dans l'autre par inversion des turbines. Des projets plus sophistiqués sont régulièrement étudiés pour une implantation en pleine mer.

Exemples

En 2010, le projet SEM-REV, site d'expérimentation en mer va tenter de profiter de l'énergie des vagues, à 20 km au large de la pointe du Croisic. Ce site bénéficiera d'instrumentation océanographique de mesure, d'une infrastructure électrique reliant le système à la côte (câble de puissance), et un local pour l'accueil des équipements de réception, de suivi et de contrôle du système en cours d'expérimentation depuis la terre. Pour plus d'informations, consultez le lien www.semrev.fr.
Le 19 octobre 2011, EDF vient d'immerger au large de l'île de Bréhat sa première hydrolienne, d'une puissance de 0,5 MW.
(voir www.meretmarine.com).

Le vent

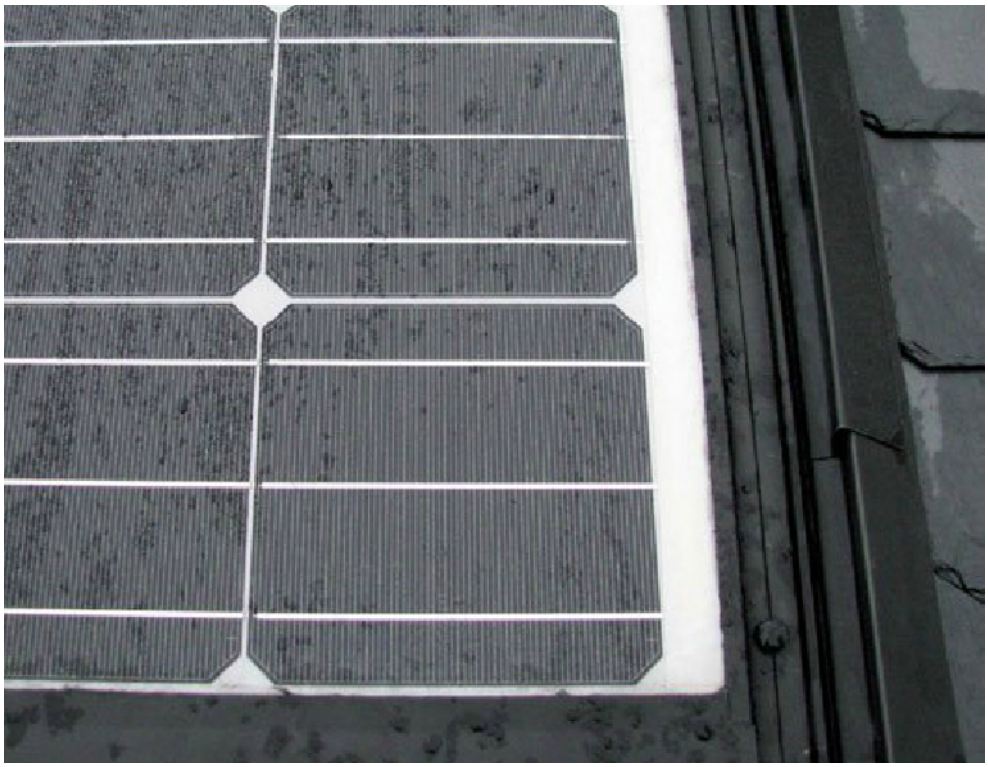
L'énergie éolienne exploite, dans les régions suffisamment balayées, la puissance du vent à l'aide d'éoliennes de plus en plus puissantes, constituant des parcs éoliens sur le territoire proche des côtes généralement ou en mer (parc offshore). Des puissances de l'ordre de 2 MW par machine sont courantes, pour des hauteurs dépassant souvent la centaine de mètres. Un couplage sur le réseau 20 kV est assuré moyennant adaptation, régulation et synchronisation.

Éolienne de 2 MW

Le soleil

L'énergie solaire active, omniprésente aujourd'hui, permet des applications différentes : le solaire photovoltaïque produit directement de l'électricité (sous forme de courant continu), à partir de modules électroniques exposés correctement à la lumière du soleil. Ils garnissent de plus en plus les toits de nos maisons, en raison sans doute de la forte incitation financière qui oblige EDF à racheter cette énergie électrique au prix fort. Toutefois pour les particuliers, la puissance maximale est limitée à 3 kWc. Le rendement énergétique de ces panneaux n'est pas très élevé, mais n'oublions pas que celui, très modeste aussi, des moteurs à explosion, n'a pas empêché le développement de l'industrie automobile. Ces panneaux alimentent en énergie électrique des sites isolés ou des populations non connectées à un réseau de distribution fiable.

Une autre filière de l'énergie solaire consiste à produire directement de la chaleur avec de l'eau, de l'air ou même de la vapeur pour les très hautes températures dans les centrales thermodynamiques. Dans ce dernier cas, le rayonnement du soleil est concentré en un foyer unique à l'aide de miroirs orientables ; la vapeur produite sera utilisée dans des turbines identiques à celles que l'on trouve dans les centrales



Panneau photovoltaïque sur un toit en ardoises

thermiques classiques, pour entrainer les alternateurs de puissance. Le capteur solaire thermique bien connu (capteur plan vitré ou tubes à vide) servira à produire l'eau chaude sanitaire dans un chauffe-eau particulier (CESI), utilisant comme fluide caloporteur souvent de l'eau glycolée en raison du risque de gel dans les panneaux capteurs exposés au soleil. Ou trouve également de plus en plus un mode de chauffage par le sol, à basse température, au moyen de conduits noyés dans le béton, nommé Plancher solaire direct (PSD). Une installation complète est fort complexe et se doit d'être en adéquation avec le bâtiment à chauffer, qui idéalement doit s'inscrire dans une démarche bioclimatique (isolation, orientation, protection estivale, stockage). L'investissement est conséquent, mais rentable sur le long terme et adapté à l'évolution des ressources énergétiques des années à venir. Souvent, sous nos régions, cette énergie solaire seule ne saurait couvrir tous les besoins et sera utilisée parfois avec l'appoint d'autres sources, fossiles bien sûr, ou par un chauffage au bois bien conçu.

La chaleur du soleil nous parvient à travers les couches de l'atmosphère, donc de l'air. L'énergie solaire reçue sur la Terre en une année équivaut environ à 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité sur la même période ! Or, malgré ses faibles caractéristiques thermophysiques, l'air peut facilement être utilisé comme fluide caloporteur, dans un système insolateur, vitré ou non. Il est donc capable de contribuer directement au chauffage partiel des locaux, au préchauffage des systèmes de ventilation ou encore au séchage de nombreux produits agro-alimentaires.

L'habitation bioclimatique exploite et favorise l'accumulation de la chaleur solaire dans des masses solides ou liquides et utilise la thermo circulation naturelle ou forcée de l'air,

comme c'est le cas par exemple pour le mur Trombe. Des capteurs aérothermiques vitrés (disposés sur la façade sud de préférence) peuvent réchauffer l'air extérieur pour l'insuffler ou élever la température ambiante des pièces d'habitation. Le Canada, chef de file dans la technologie du chauffage à air chaud, a inventé un système de capteur perforé non vitré, qui couvre les façades de nombreux bâtiments, et ce avec une durée de vie très longue en raison du peu d'entretien que nécessite ce procédé (procédé Solarwall).

Nous pensons qu'avec le chauffage solaire à air chaud, il y a matière à réduire considérablement la facture du chauffage des particuliers, et plus particulièrement de ceux qui occupent une habitation déjà ancienne ou non adaptée à des travaux importants de PSD. L'objet de notre ouvrage est justement de décrire et de justifier le choix de cette application solaire, peu prisée en France – il nous faut bien le reconnaitre. Et pourtant, la simplicité de mise en œuvre de cette technologie autorise une personne motivée et pas trop maladroite à une autoconstruction totale. Et il n'est point utile de disposer d'un outillage particulier ou de composants coûteux ou introuvables. Bien entendu, on trouve sur le marché quelques offres de panneaux solaires à air, prêts à poser.

Les avantages des panneaux aérothermiques sont fort nombreux, surtout en les comparant à ceux qui font appel à un fluide caloporteur liquide. Jugez plutôt :

- Fiabilité élevée, due à la conception simple du capteur, sans aucune pièce mobile. (« La simplicité est la sophistication suprême » disait Léonard de Vinci).
- Pose verticale aisée en façade sud dans l'idéal. Un léger décalage est ou ouest, ne diminue pas notablement le rendement. Démontage possible à l'occasion. Cette verticalité solutionne en partie la surchauffe estivale.
- Rendement élevé, de l'ordre de 1000 W/m^2 pour un ensoleillement suffisant.
- Pas de fuites, ni de protection à prévoir contre le gel. Un épisode neigeux n'a aucune incidence sur son fonctionnement, au contraire même, car le sol blanc améliore l'albédo, donc la réflexion des rayons solaires.
- Introduction d'une petite inertie quant à la restitution de la chaleur accumulée, en raison de l'utilisation d'un absorbeur particulièrement bien adapté à cet usage (prix, aspect, capacité et effusivité thermique). Le matériau naturel utilisé présente en outre une couleur sombre qui dispense de le revêtir d'une peinture ou d'un traitement plus ou moins toxique.
- Coût très réduit, le vitrage trempé pouvant être remplacé par une plaque de polycarbonate alvéolaire, si l'esthétique n'est pas un critère prioritaire.
- Auto-construction aisée, outillage très ordinaire pour la partie capteur.
- Amortissement très rapide et durée de vie très longue si les composants choisis sont prévus pour l'extérieur (30 ans ou plus sans intervention).
- Peu ou pas d'entretien (vitrage, filtre à air pour les poussières à l'entrée dans la pièce à chauffer).
- Automatisation totale possible par gestion électronique et trappe motorisée sur l'air chaud pour éviter l'inversion de flux nocturne.

Capteur thermique
pour CESI

- Réglage éventuel de la température récupérée par action sur la vitesse, donc sur le débit d'un ventilateur externe de très faible puissance.
- Possibilité d'utiliser un dispositif photovoltaïque complet (capteur, régulateur, batterie 12 volts) afin de disposer d'une autonomie totale pour la commande électronique de l'insolateur.
- Une gestion astucieuse des flux d'air peut éventuellement contribuer à rafraichir une pièce en période estivale. Un ensoleillement excessif pourra être fortement atténué par une évacuation supérieure sur le capteur, lui-même protégé par un dispositif brise-soleil adapté (latitude du lieu et saisonnalité).

Le point de vue de l'auteur

J'ai installé depuis plus de 25 ans un panneau de ce type, à titre expérimental, pour apporter un appoint solaire à une pièce orientée plein sud, de 12 m² environ. Le chauffage intégré par convecteur à thermostat électronique est alimenté par un double tarif EDF HC/HP. On a pu largement constater que le réglage à 15 °C environ du thermostat du convecteur électrique permet au capteur placé en façade de se comporter en quelque sorte comme un multiplicateur de chaleur, grâce notamment à la convection naturelle de l'air chaud. Et le système de ventilation à double flux de la maison n'est pas beaucoup perturbé par cet apport solaire.

On trouvera dans les chapitres suivants tous les détails pour la réalisation pas à pas de ce type de capteur, photos à l'appui. Une partie électronique présentera divers montages utiles à la gestion et surtout à l'automatisation de cette application solaire (solarimètre, thermostat à hystérésis pour la commande de trappe anti-retour, réglage PWM du petit ventilateur à courant continu, centrale de pilotage compacte à microcontrôleur pour un panneau aérothermique autonome). Une alimentation 12 volts par panneau photovoltaïque sera évoquée, le soleil restant dès lors le seul acteur de notre capteur aérothermique avec une énergie totalement renouvelable !

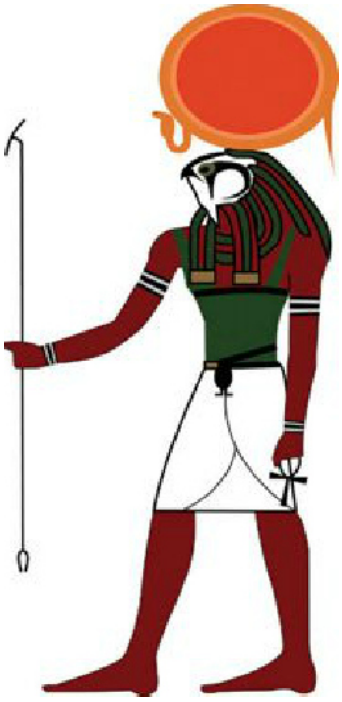
1 PARTIE

INTRODUCTION à l'énergie solaire

Le soleil, ses croyances, ses inventeurs

Les croyances

Le soleil, source de lumière et de chaleur, de puissance, de vie et de mort, a été vénéré très tôt dans l'Histoire des civilisations, sous des noms et des formes très différentes.
Le dieu Soleil babylonien ou Shamash, est représenté symboliquement par une roue à rayons. Dans la mythologie égyptienne, Rê ou Râ est le grand Dieu du soleil, divinité principale avec une tête de faucon surmontée du disque solaire.


Dieu Râ

Les Grecs vénéraient Hélios, jeune homme d'une grande beauté, à la chevelure d'or, comme les rayons du soleil qu'il est sensé personnifier. Hélios fût éclipsé par Apollon (Dieu du soleil), que les Romains adoptèrent sous le nom de Phoebus. À noter que l'équivalent romain d'Hélios est Sol.

Inti est la manifestation inca du soleil, et cette force fût reconnue par bon nombre de peuples andins. Ceux-ci croyaient devoir nourrir leur Dieu solaire de sang et de cœurs humains, afin de le voir réapparaître le lendemain à l'Est. Il était représenté par un disque solaire à face humaine, entouré de rayons lumineux. De nos jours encore, le Japon est appelé « Pays du soleil levant ». Le drapeau japonais est précisément composé d'un cercle rouge sur un fond blanc, adopté officiellement en 1870. Chaque année, des milliers de Japonais se retrouvent à l'aube du jour de l'an pour claquer deux fois dans les mains, quand le soleil apparait, espérant ainsi s'attirer les bonnes grâces divines.

Le Roi Soleil

Nous en terminerons par une évocation de Louis XIV le Grand, dit le Roi Soleil, qu'il avait choisi pour emblème. C'est l'astre qui donne vie à toute chose, symbole de l'ordre immuable et de la régularité. La couleur de l'or lui convient parfaitement, et ce luxe est omniprésent à Versailles. De plus, il se lève et se couche au vu et au su de tous. De même, Louis XIV sera lui le Soleil rayonnant sur son royaume, permettant aux courtisans d'assister à toutes les étapes de sa journée. Il ira jusqu'à apparaitre habillé en Soleil lors d'une fête à la Cour.

Les inventeurs

Voici une liste non exhaustive de quelques personnages plus ou moins connus, qui ont contribué à leur manière et dans leur domaine à faire avancer nos connaissances du soleil et de ses applications…

Socrate (470-399 avant J.-C.)
On admet généralement que ce philosophe grec a enseigné la construction bioclimatique en faisant orienter au Sud les maisons, avec une bonne gestion des zones d'ombre l'été, et une pénétration solaire plus profonde en hiver, en raison d'un angle plus réduit sur l'horizon. L'architecture des cités de l'époque instituait donc un véritable droit au soleil.

Archimède (287-212 avant J.-C.)
Ce célèbre mathématicien aurait réussi à concentrer les rayons du soleil à l'aide de miroirs géants, pour incendier les navires romains lors du siège de Syracuse. On peut néanmoins en douter, car à cette époque, seuls des miroirs en bronze poli étaient utilisés. L'expérience renouvelée en 2006 n'a jamais été très probante. Nous en conservons l'idée, en admettant tout de même que la concentration des rayons solaires peut dans certaines conditions, aboutir à une très forte élévation de température, comme le prouveront plus tard Lavoisier et plus près de nous Mouchot et Trombe.

Nicolas Copernic (1473-1543)
Ce chanoine polonais fût convaincu très jeune que notre terre n'occupait pas le centre du monde, comme on l'affirmait à l'époque. Il publia en 1543, juste avant sa mort, son traité d'héliocentrisme, où le soleil est le centre de l'univers. Et la terre n'est plus qu'une planète parmi les autres, qui fait sa révolution solaire en une année tout en tournant sur son axe.

Isaac Newton (1642-1727)
Cette figure emblématique du monde scientifique donna en 1669 une théorie de la décomposition de la lumière blanche. Il mit en évidence la notion de longueur d'onde liée à la couleur, à l'aide d'un prisme.

Horace Bénédict de Saussure (1740-1799)

Ce physicien suisse est considéré comme l'inventeur de la « boîte chaude » en 1767. Il s'intéressa à l'effet de serre au moyen de vitrages superposés et de ce fait son invention est considérée, à juste titre d'ailleurs, comme le précurseur du capteur solaire plan. Nous aurons l'occasion de lui rendre hommage plus loin, notre réalisation n'étant qu'une version améliorée de sa « boîte chaude » nommée héliothermomètre.

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)

Plus connu sans doute comme chimiste, il réalisa pourtant en 1774 un premier four, en concentrant les rayons solaires à l'aide de lentilles convergentes. Il réussit à fondre des métaux, dont le platine à 1800 °C.

Joseph Fourier (1768-1830)

Mathématicien et physicien français, il est surtout célèbre grâce à la série et à l'intégrale qui porte son nom. Mais son œuvre *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, publié en 1824, nous concerne au plus haut point. Il interpréta scientifiquement les expériences de H.-B. de Saussure, et jeta les bases de la compréhension des équilibres thermiques qui régissent notre atmosphère. Il aborde la notion de chaleur obscure que nous dénommons de nos jours sous le terme d'ondes infrarouges. Il décortique parfaitement le fonctionnement du capteur plan décrit dans cet ouvrage et précise le rôle du vitrage dans la création de l'effet de serre et la capture des calories solaires.

Antoine Becquerel (1788-1878)
L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la conversion de la lumière directement en électricité est l'une de ses découvertes en 1839. Il nous faudra attendre un siècle de plus pour voir se développer vraiment cette énergie photovoltaïque, alimentant notamment les premiers satellites en énergie. Gageons que de nos jours nombreux sont les heureux propriétaires de toits solaires PV ignorant le nom de cet illustre français, dont le petit-fils Henri, a découvert la radioactivité. Quelle famille !

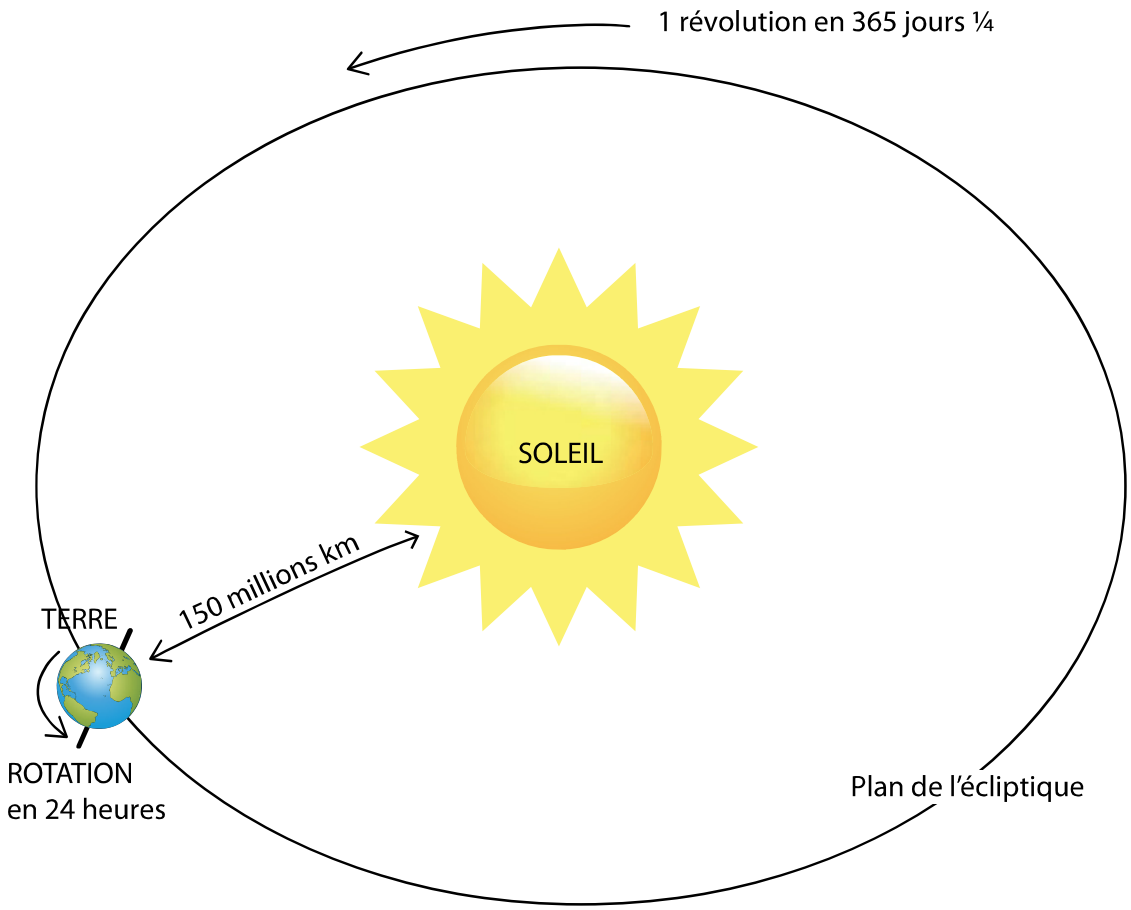
Augustin Mouchot (1835-1912)
Dès 1860, ce professeur de mathématiques pressentait que le charbon viendrait inévitablement à manquer un jour en Europe. Il inventa un système de poursuite solaire avec un capteur à concentration, présenté à l'exposition universelle de Paris en 1878. Il expérimenta nombre d'applications de cuisson solaire, et prouva que l'énergie solaire peut être convertie en force motrice.

Arthur Brown (1900-1993)
Cet architecte américain est considéré comme le créateur de l'architecture solaire moderne. Sa maison à Tucson, en Arizona, est quasiment la première maison solaire passive, avec une façade vitrée sud sur un mur plein faisant office de masse thermique, sans oublier un toit prolongé pour se prémunir du soleil en été. Rappelons que le double vitrage a été commercialisé vers 1935 sous le nom de « thermopane ».

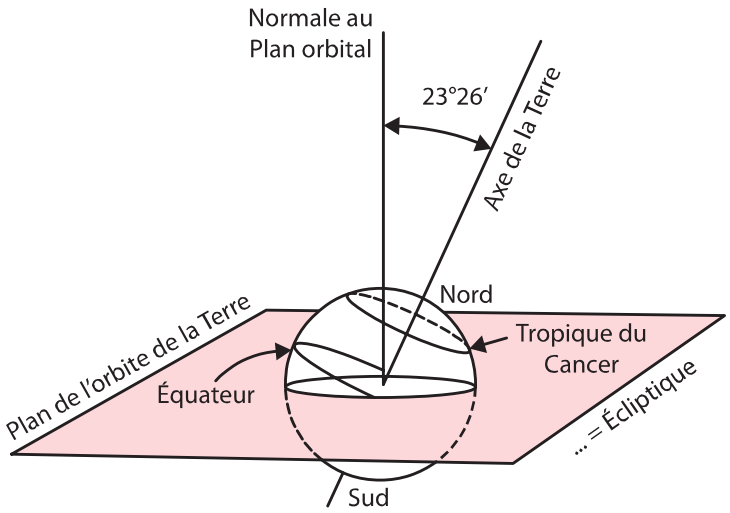
Félix Trombe (1906-1985)
C'est là l'un des pionniers français du solaire et son nom reste souvent associé au mur massif peint en noir, qui derrière un vitrage vertical accumule le rayonnement solaire du jour pour le restituer progressivement la nuit. Il est plus connu encore pour ses travaux sur les très hautes températures liées à l'énergie solaire. Il est à l'origine de plusieurs fours solaires dont celui d'Odeillo à Font-Romeu dans les Pyrénées. D'une puissance de 1000 kW, cette réalisation spectaculaire est utilisée exclusivement à des fins scientifiques sur la résistance des matériaux.

Le soleil et la Terre

Le soleil est l'étoile la plus familière dans notre ciel et il est probablement plus ancien que notre Terre, puisqu'âgé d'environ 4,6 milliards d'années. Sans lui, il est évident que notre planète ne serait qu'un rocher galactique glacé. Et la température de 6000 °K de l'astre éclaire et réchauffe aisément celle-ci et pour de très nombreux millénaires encore.
La Terre effectue donc une révolution autour du soleil, selon une trajectoire assez proche d'un cercle (plan de l'écliptique ou orbite de la terre). La distance Terre-soleil est approximativement de 150 millions de kilomètres, et il faut 8 minutes à sa lumière ou énergie pour nous parvenir ! Ce tour complet dure 365 jours et ¼, ce qui correspond bien à notre année. On comprend immédiatement que tous les 4 ans une année bissextile de 366 jours permet de compenser 4 fois le retard de ¼ de jour qui s'accumule.



Trajectoire de la terre



Inclinaison de la terre

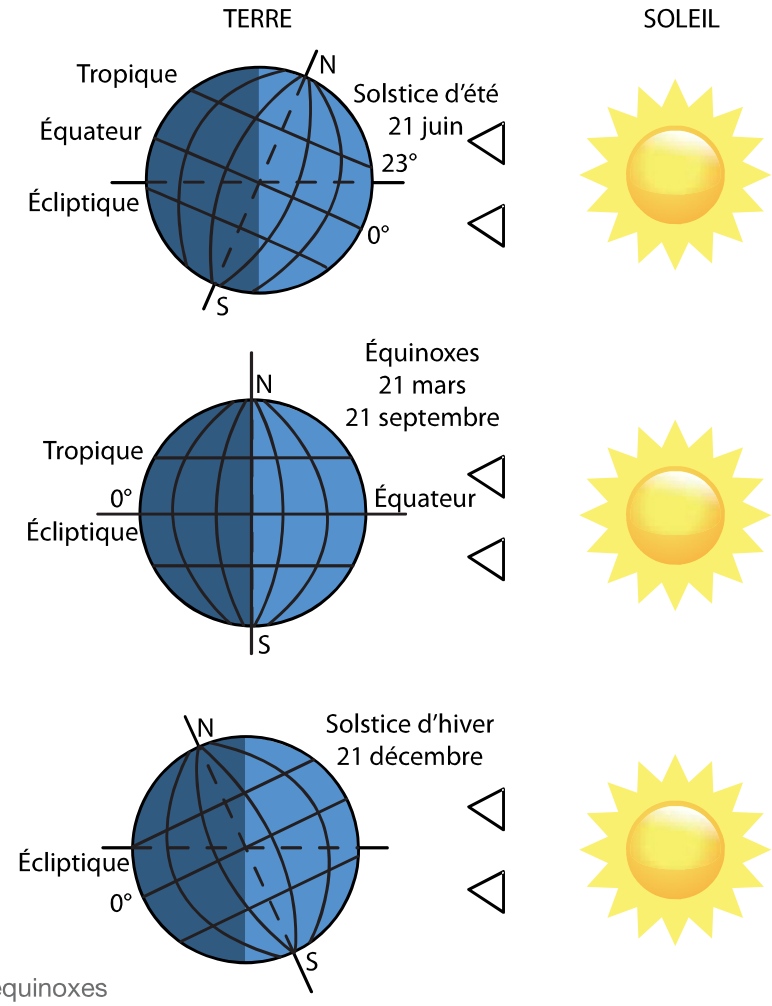
Cependant, la Terre réalise également une rotation sur elle-même quasiment en 24 heures (jour sidéral), soit une journée formée d'une partie éclairée ou jour et d'une autre partie non éclairée, la nuit. De plus, l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de rotation autour du Soleil, mais forme un angle de quelque 23,5 degrés. On peut dire également que le plan équatorial qui coupe notre globe terrestre en deux parties égales est lui aussi décalé de cet angle. Nous résumons cette géométrie spatiale dans la figure suivante :

Cette inclinaison provoque deux phénomènes importants concernant la durée du jour et de la nuit :

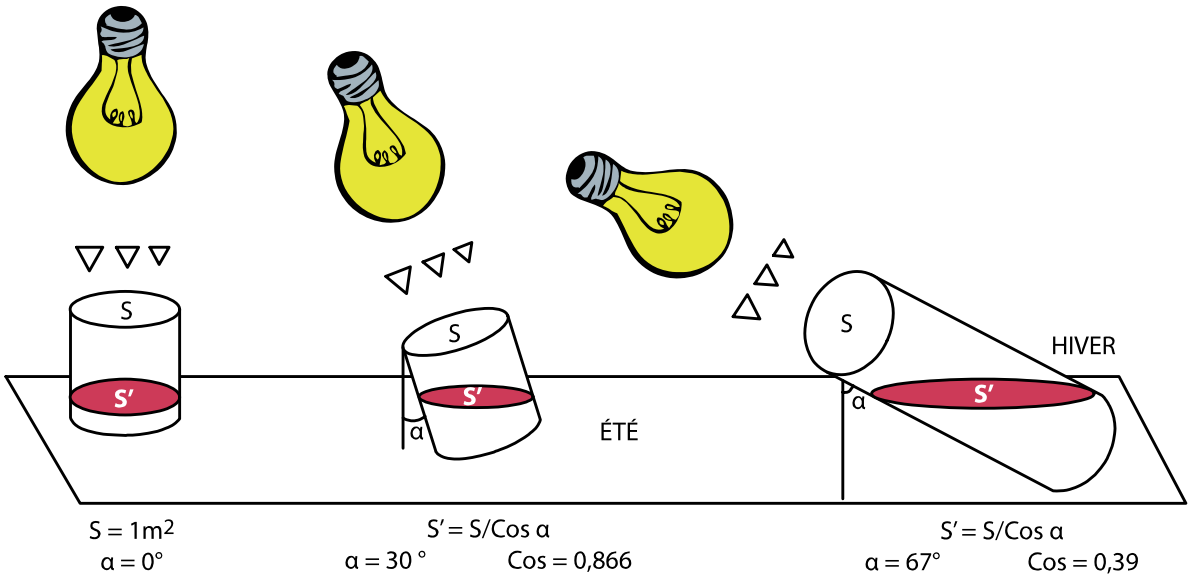
- elle n'est pas régulière,
- elle change au cours de l'année.

Seulement aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre) à midi, partout sur le globe le jour et la nuit sont de durée égale. Chacun sait bien qu'en été le soleil est présent plus longtemps. A contrario en hiver il fait nuit de bonne heure.

Toujours en raison de l'inclinaison variable des rayons solaires, nous sommes soumis à des saisons : pour un éclairement estival, alors que le soleil est haut, la surface couverte par l'énergie solaire est plus petite, donc il fait bien plus chaud. Inversement en hiver la surface couverte est bien plus grande, et donc le sol terrestre reçoit moins d'énergie par mètre carré. Il fait évidemment plus froid. (Ou encore la densité de chaleur est plus faible !)



Solstices et équinoxes



Hiver et été

Au cours de l'année, pour un observateur sur terre, la direction du lever et du coucher du soleil, ainsi que sa hauteur au zénith (au plus haut dans le ciel) varient constamment. En fait, les trajectoires observées dépendent également pour beaucoup de la latitude du lieu d'observation.

La position du soleil au cours de l'année nous intéresse au plus haut point. En effet, en admettant que l'on dispose d'une façade verticale orientée plus ou moins plein sud, c'est sur celle-ci que sera fixé notre capteur aérothermique. Il recevra dès le matin l'énergie solaire qui débute sa course vers l'Est pour s'élever (plus ou moins selon les saisons) et disparaître le soir en direction de l'ouest. La hauteur maximale du soleil est différente en été et en hiver, mais on emploie encore volontiers l'expression « il est midi au soleil » pour le soleil culminant. Sa hauteur se détermine aisément selon la latitude du lieu considéré.

Au solstice d'été, donc le 21 juin, l'angle d'inclinaison de l'axe des pôles est maximal par rapport aux rayons solaires.

Suivons l'exemple

Nous prendrons pour tous nos exemples la latitude de Cholet, en Pays de Loire, à savoir 47 degrés 04 minutes Nord.

Une petite explication s'impose à propos de cette latitude, qui avec la longitude permet de situer tout point sur notre planète (voir coordonnées GPS !). Il s'agit d'un angle mesuré en degrés, minutes et secondes d'arc ; sur le globe terrestre, les lignes de latitude sont en quelque sorte des cercles concentriques à celui de l'équateur, habituellement placé à la latitude 0° comme référence. Ces cercles se réduisent en allant vers les pôles, placés à 90° dans l'hémisphère nord, le notre, et à -90° pour l'hémisphère sud. On peut encore imaginer que la latitude d'un point sur terre représente l'angle (défini par la lettre grecque alpha = α) que forme ce point avec le centre de la terre par rapport au plan de l'équateur.

Dans notre cas

À Cholet toujours, il vaudra donc :

H = 90° - (angle de la latitude) + inclinaison de la terre

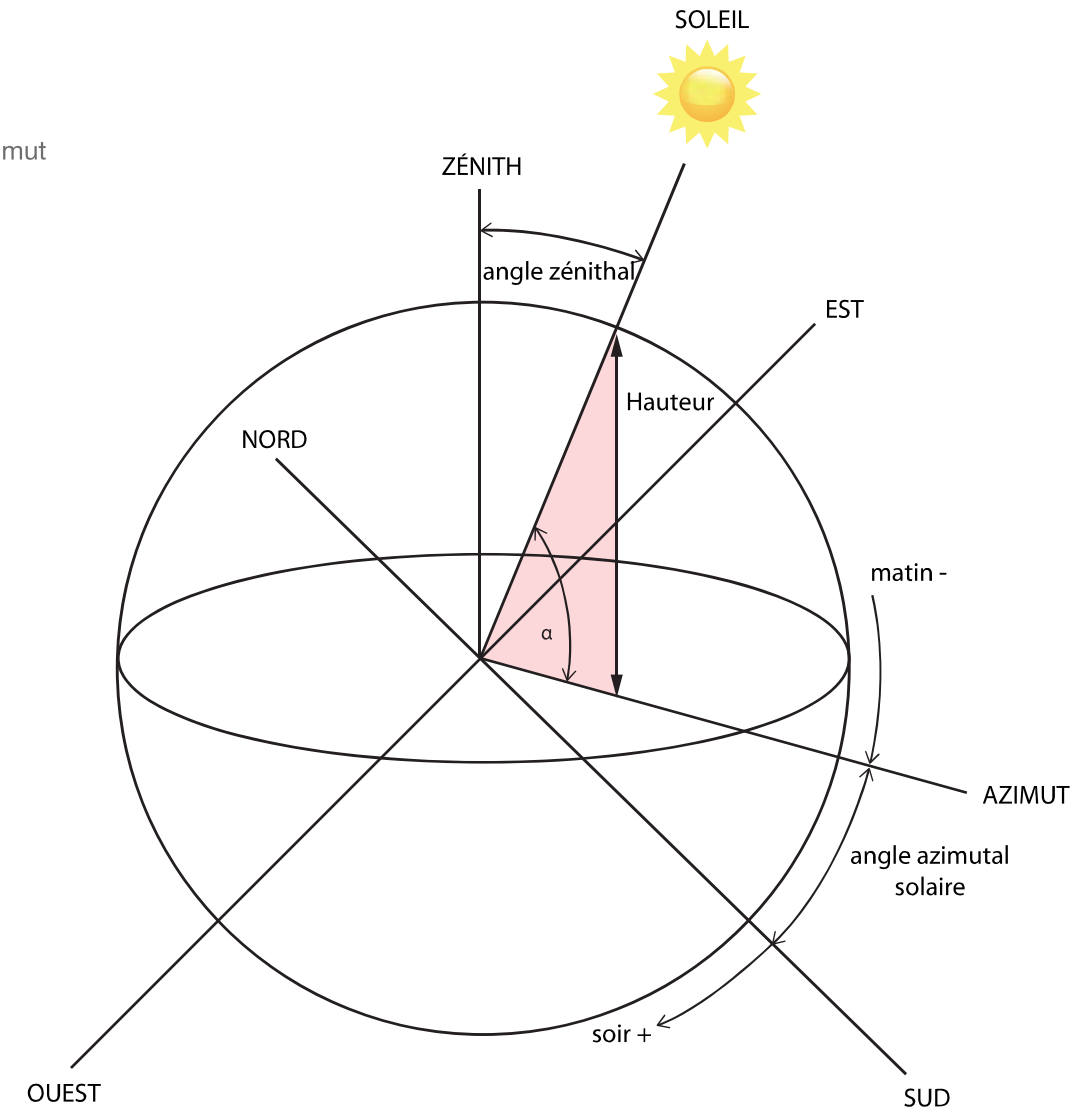
H = 90° - 47° + 23,5° = 66,5°. Le soleil est haut en été.

Au solstice d'hiver, le 21 décembre, l'angle de la terre est inversé, la hauteur maximale vaudra donc :

H = 90° - latitude - inclinaison de la terre

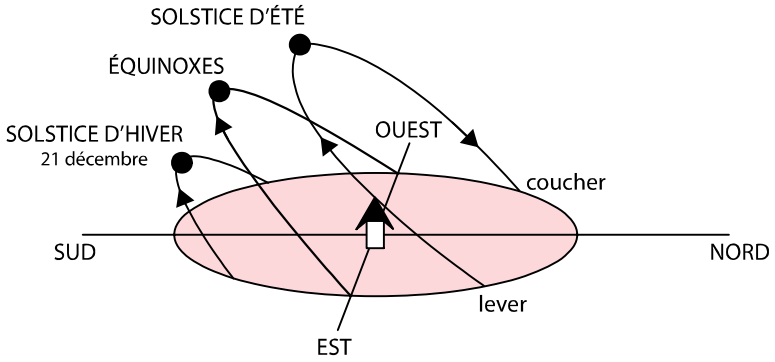
H = 90° - 47° - 23,5° = 19,5°. Le soleil est bas sur l'horizon en hiver.

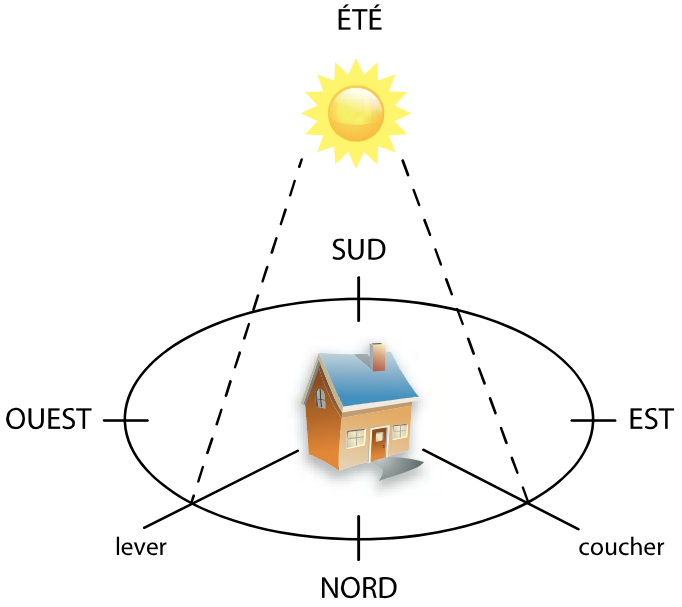
Zénith et azimut

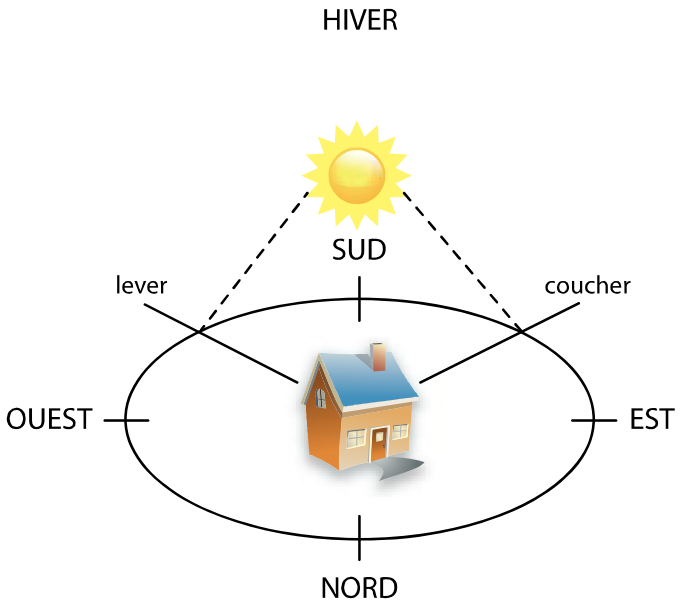


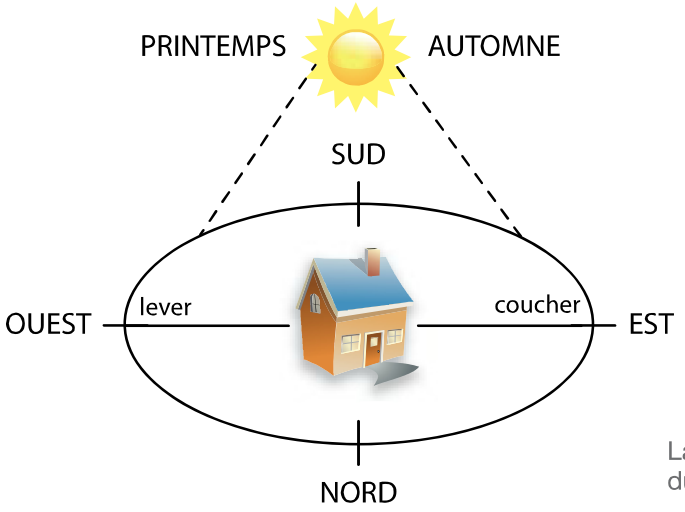
À noter, aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre), au zénith, le rayonnement solaire est perpendiculaire à l'équateur. La hauteur solaire est donc simplement égale à l'angle complémentaire de la latitude.

H = 90° - 47° = 43°



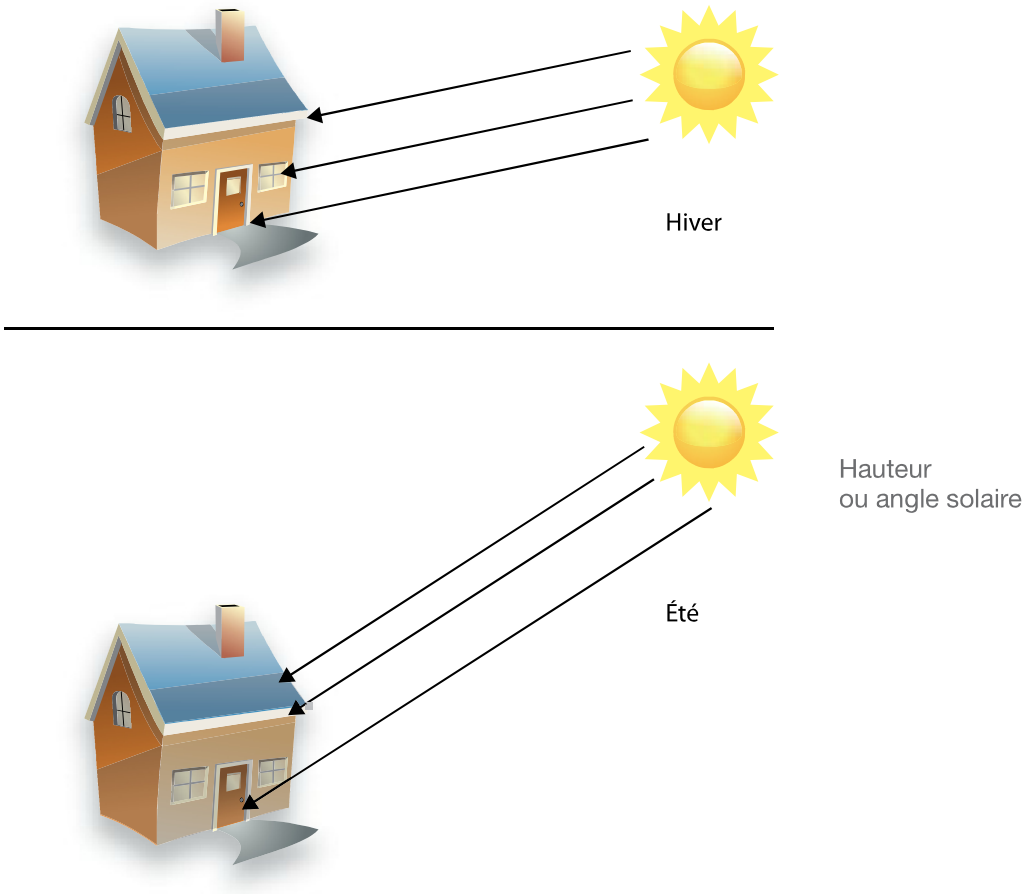






Latitude et durée du jour

Nous exploiterons cette variation angulaire pour capter un maximum d'énergie en hiver, c'est-à-dire en disposant notre insolateur le plus perpendiculairement possible aux rayons solaires, mais pratiquement à la verticale sur la façade Sud. Il va sans dire qu'en été, le capteur devra, autant que faire se peut, être ombragé, et la position haute du soleil lui évitera une surchauffe inutile, avec un pare-soleil ou protection complémentaire si nécessaire.



La durée du jour est simplement l'intervalle qui sépare le lever et le coucher du soleil ; cette durée dépend bien entendu de la latitude du lieu considéré et du jour de l'année. On trouve approximativement pour nous une durée de jour de 15 heures 55 minutes autour du 21 juin, alors que celui-ci ne dure que 8 heures et 30 minutes le 21 décembre. Toujours à Cholet, aux équinoxes où le jour et la nuit sont sensiblement de même durée, on calcule 12 heures et 16 minutes. On pourra constater lors des bulletins météorologiques journaliers le gain ou la perte de temps, en minutes, dans l'éphéméride.

Un outil incontournable

Nous vous proposons de consulter et d'exploiter un petit logiciel canadien épatant, disponible gratuitement sur le Web, en n'hésitant pas à rentrer les coordonnées exactes de votre recherche avant de faire apparaitre les résultats et la courbe correspondante. (www.ptaff.ca/soleil)

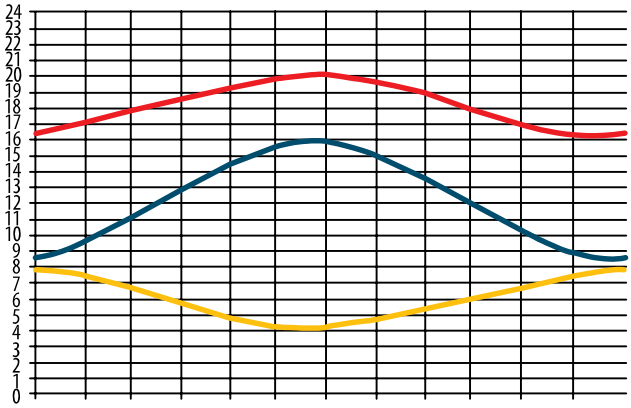
Choisir un pays ; Compléter les spécifications, surtout si votre ville ne figure pas dans la liste et si vous connaissez la latitude et longitude de votre ville :

Pour Cholet latitude = 47 ° 03 ' 36 '' Nord et longitude = 0° 52 ' 42 '' Ouest

Et lancez les calculs. Vous obtiendrez des courbes annuelles magnifiques…

Lever, coucher du soleil et durée du jour

Heures pour Cholet



Cholet

Coordonnées : 47° 03' 36" N 0° 52' 42" O

Fuseau horaire : 0 UTC

Lever du soleil (aujourd'hui 7h48)

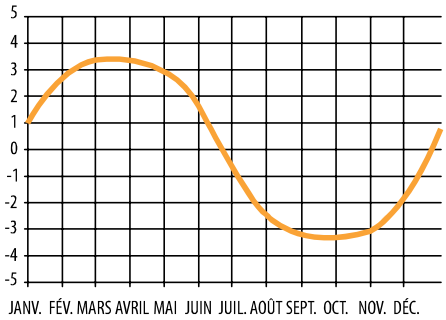
Coucher du soleil (aujourd'hui 16h34)

Durée d'éclairement (aujourd'hui 8h46)

(01/10/2011)

Variation quotidienne de la durée du jour

Minutes pour Cholet



Cholet

Coordonnées : 47° 03' 36" N 0° 52' 42" O

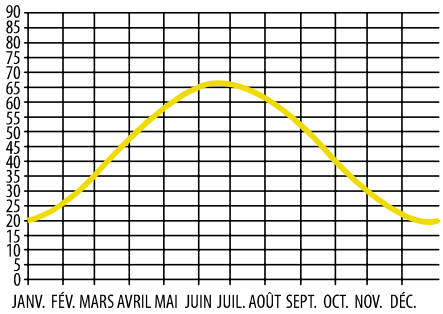
Fuseau horaire : 0 UTC

Différence (aujourd'hui 1.58 minutes)

(01/10/2011)

Altitude maximale du soleil

Degrés pour Cholet



Cholet

Coordonnées : 47° 03' 36" N 0° 52' 42" O

Fuseau horaire : 0 UTC

Altitude du soleil (aujourd'hui 20°9)

(01/10/2011)

L'énergie solaire

L'atmosphère ou enveloppe gazeuse qui entoure la terre joue plusieurs rôles :

- Elle contient l'air que nous respirons, et permet en général à la vie de se développer sur la planète bleue (avec l'eau).
- Certains de ses composants nous préservent, à la manière d'un écran, des rayons nocifs du soleil (ultraviolets = UV).
- Elle se laisse traverser par les rayons solaires, mais retient une bonne part de la chaleur captée et produite par la terre sous la forme d'infrarouges (= IR).

En fait, la couche « utile » de notre atmosphère se nomme la Troposphère, et se situe entre 0 et 17 kilomètres d'altitude. Tous les phénomènes météorologiques s'y créent et s'y développent, pour restituer notre climat et ses nombreuses variantes. Si la terre ne possédait pas cette couche protectrice, les rayons IR s'échapperaient à nouveau dans l'espace, et la température moyenne au sol serait de -18 °C ! Elle est actuellement de 15 °C et permet à la vie humaine de s'y maintenir.

Constitution de l'atmosphère

On trouve principalement de l'azote et de l'oxygène, pour 99 % du volume. D'autres constituants sont présents, en faible quantité mais jouant un rôle primordial dans notre survie.

Composition de l'air sur terre

	Gaz	Symbole	Proportion en %	Observation
Gaz principaux	Azote	N_2	78	
	Oxygène	O_2	21	
Gaz inertes	Argon	Ar	0,93	
	Néon	Ne	0,02	
	Krypton	Kr		
	Xénon	Xe		
Gaz à effet de serre	Vapeur d'eau	H_2O	variable	
	Gaz carbonique	CO_2	0,03	Énergies fossiles ↗
	Oxyde d'azote	N_2O	traces	↗
	Ozone	O_3	traces	Diminue aux pôles = trou

L'énergie solaire nous parvient sous forme de rayonnement électromagnétique, dont la lumière visible ne représente qu'une partie. Le spectre solaire est très vaste et s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le rayonnement perceptible par l'œil humain, la lumière du jour en somme. On peut définir ces rayonnements par leur longueur d'onde, qui précise également les différentes couleurs perçues.

Les ultraviolets représentent environ 5 % du spectre, et leur longueur d'onde va de 280 à 380 nanomètres. Ils sont invisibles pour l'œil humain, mais leurs effets sur la peau l'été est bien réelle… et douloureusement colorée !

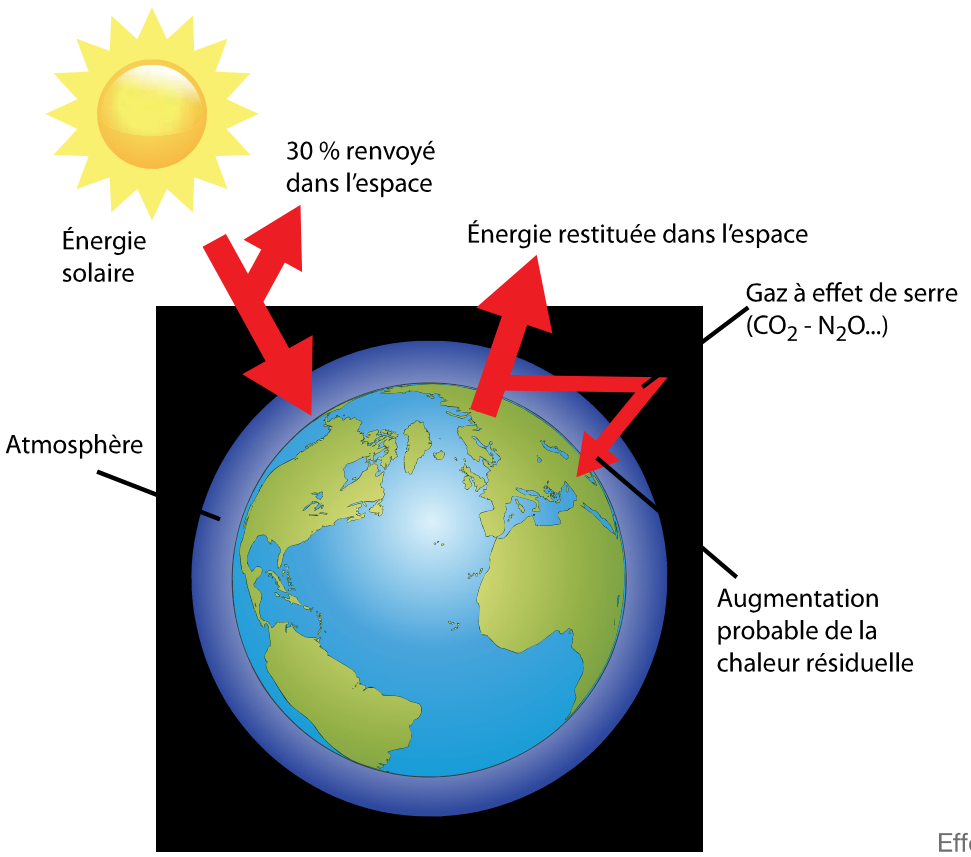
Les infrarouges, vecteurs essentiels de l'énergie thermique, couvrent environ 45 % de l'ensemble ; leur longueur d'onde s'étend de 780 à 2500 nm environ. Ils restent eux aussi invisibles, comme on peut le vérifier sur les nombreuses télécommandes dont nous disposons chez nous.

Quant à la partie visible des rayons solaires, elle couvre les 50 % restant, entre 380 et 780 nm. Par ailleurs, les couleurs de l'arc-en-ciel constituent un bon exemple pour matérialiser les constituants du spectre stimulant le nerf optique humain.

Tableau : spectre visible

Ondes ultraviolet	
380 nm	violet
430 nm	indigo
470 nm	bleu
530 nm	vert
580 nm	jaune
600 nm	orange
680 nm	rouge
Ondes infra rouges	

On estime à 1350 W/m^2 l'énergie totale atteignant une surface perpendiculaire aux rayons solaires, dans les hautes couches de l'atmosphère : on parle dans ce cas de la Constante solaire. La totalité du rayonnement solaire ne parvient évidemment pas sur notre planète, car on estime à 30 % la portion de l'énergie directement renvoyée dans l'espace par les nuages. Le reste est plus ou moins bien absorbé par la surface de la terre, sous forme directe, diffuse ou réfléchie. Cette énergie solaire est réémise, pour faire simple, sous forme de rayonnement infrarouge que notre atmosphère retient en partie seulement grâce ou à cause des gaz à effet de serre (GES). Mais il ne faudrait pas que ceux-ci retiennent davantage ces IR, sous peine d'un réchauffement climatique catastrophique, et qui semble d'ailleurs déjà amorcé ! On pense que notre utilisation des énergies fossiles depuis près de 200 ans a provoqué cette augmentation inexorable de la concentration des GES (surtout le CO_2), avec pour conséquence d'altérer l'équilibre fragile du système climatique terrestre.



Effet de serre

Au niveau géographique mondial, l'énergie solaire est inégalement répartie. Une région dite chaude du globe pourra produire jusqu'à 2300 kWh/m² et par an. En Europe centrale cette valeur est bien moindre ; et pour la France, il y a une importante différence d'ensoleillement entre le Nord et le Sud du territoire. Pourtant, l'exploitation de l'énergie solaire est possible et rentable quasiment partout, il suffit simplement d'augmenter la surface des capteurs et de soigner leur orientation. Rappelons que l'Allemagne dispose de bien plus de capteurs solaires que la France (on estime son parc 5 fois plus important que le nôtre !) malgré une irradiation solaire bien moins généreuse.

On pourra être intéressé également par les heures d'ensoleillement annuelles selon les régions. Il faut savoir que Météo France a défini un seuil d'insolation de 120 W/m², à partir duquel on peut considérer qu'il y a du soleil. Au cours d'une journée, la présence de nuages

Le gisement solaire

Voici quelques chiffres du gisement solaire en France :

À Lille, latitude 50°38 N, 1100 kWh/m²/an.
À Lyon, latitude 45°45N, 1400 kWh/m²/an.
À Marseille, latitude 43°18N, 1900 kWh/m²/an.

ou un ciel couvert peuvent effectivement réduire à peu de chose la puissance émise par le soleil, et donc susceptible d'être captée et exploitée sous forme de chaleur ou de courant pour les cellules PV. Nous vous proposerons de construire un appareil capable de mesurer cette puissance solaire, dans le chapitre consacré aux réalisations électroniques (voir p. 86) : il s'agit d'un solarimètre à affichage digital, directement étalonné en W/m^2.

Si la zone nord ne dispose en moyenne que de 1750 heures de soleil, il est clair que la région PACA sera très favorisée avec plus de 2750 heures par an. Dans cette région, l'exploitation solaire se contentera de surfaces plus réduites… pour le solaire thermique s'entend. On trouve facilement bon nombre de cartes précisant les valeurs liées à l'énergie solaire de votre région. Voici un tableau de quelques villes en France, leur latitude, leur ensoleillement annuel et l'énergie solaire moyenne par m^2/an pour une orientation optimale (plein sud, tenant compte de la latitude du lieu en inclinaison).

Aller plus loin

Nous vous conseillons de consulter quelques sites internet proposant de superbes cartes de France de l'éclairement et de l'irradiation solaire (critères de recherche = cartes gisement solaire).

VILLE	LATITUDE N	ENSOLEILLEMENT en nombre d'heures	IRRADIATION en KWh/m^2/an
Perpignan	42° 42	2392	1699
Marseille	43° 18	2801	1809
Nice	43° 42	2668	1775
Pau	43° 18	1852	1535
Montauban	44° 01	2029	1510
Nîmes	43° 50	2588	1712
Bordeaux	44° 50	1992	1486
Aurillac	44° 55	2084	1511
La Rochelle	46° 10	2055	1504
Limoges	45° 50	1860	1457
Lyon	45° 45	1932	1453
Poitiers	46° 35	1867	1449
Angers	47° 29	1690	1403
Bourges	47° 05	1787	1346
Besançon	47° 15	1797	1287
Brest	48° 24	1492	1335
Melun	48° 32	1731	1283
Strasbourg	48° 35	1633	1203
Cherbourg	49° 39	1460	1314
Rouen	49 ° 27	1518	1228
Metz	49° 08	1605	1191
Abbeville	50° 06	1624	1152

L'aérothermie solaire

Un peu d'histoire…

Les précurseurs : il semblerait que ce soit Horace Bénédict de Saussure, physicien suisse, qui inventa et expérimenta en 1767 (déjà) la « boîte chaude », ancêtre de notre capteur à air ou capteur plan vitré. Passionné par l'alpinisme qu'il pratiquait et fasciné par le Mont Blanc, il voulait comprendre pourquoi il faisait plus froid en montagne qu'en plaine. Il disait : « (…) je voulus voir si les rayons directs du soleil auraient, sur la cime d'une haute montagne, la même efficacité que dans la plaine, lorsque le corps sur lequel ils agiraient, serait de manière à ne pouvoir être que peu ou point refroidi par l'air environnant (…). »
Il réalise donc le premier capteur solaire qu'il nomma « héliothermomètre », en précisant l'origine de son idée : « (…) c'est un fait connu et sans doute depuis longtemps, qu'une chambre, un carrosse, une couche, sont plus fortement réchauffés par le soleil, lorsque ses rayons passent au travers de verres ou de châssis fermés, que quand ces mêmes rayons entrent dans les mêmes lieux ouverts et dénués de vitrages. On sait même que la chaleur est plus grande dans les chambres dont les fenêtres ont un double châssis (…) ».
Songez un peu à la chaleur importante qui règne dans l'habitacle de nos véhicules fermés, sous le soleil sur un parking, après plusieurs heures ! Une étuve assurément, et le simple contact sur le revêtement sombre des sièges ou sur le tableau de bord est quasiment impossible.
Cette amplification de la chaleur solaire a donc été testée et mesurée par H.-B. de Saussure, à l'aide d'une boîte dont il nous donne une description précise, faute d'avoir pu récupérer son appareil original : « (…) Je fis donc faire une caisse en sapin d'un pied de longueur (= 32 cm) sur 9 pouces (= 24 cm) de largeur et profondeur hors d'œuvre ; cette caisse de ½ pouce d'épaisseur (= 1,3 cm) était doublée intérieurement d'un liège noir d'un pouce (= 2,7 cm). J'avais choisi cette écorce comme une matière légère et en même temps très coërcente ou très peu perméable à la chaleur. Trois glaces entrant à coulisse dans l'épaisseur du liège et placées à un pouce et demi de distance l'une de l'autre (= 4 cm) fermaient cette boîte de manière que les rayons du soleil ne pouvaient parvenir au fond de la boîte qu'après avoir traversé ces trois glaces.
« Pour que le soleil frappât toujours perpendiculairement ces glaces, qu'il fît par cela même la plus grande impression sur elles, et souffrît le moins de réflexion possible, j'avais soin dans mes expériences de faire suivre à ma caisse le mouvement du soleil, en la retournant régulièrement toutes les 20 minutes, de sorte que le soleil éclairât exactement la totalité du fond de la caisse. La plus grande chaleur que j'ai obtenu par ce moyen a été de 87,7, c'est-à-dire de près de 8 degrés au-dessus de la chaleur de l'eau bouillante (…). »

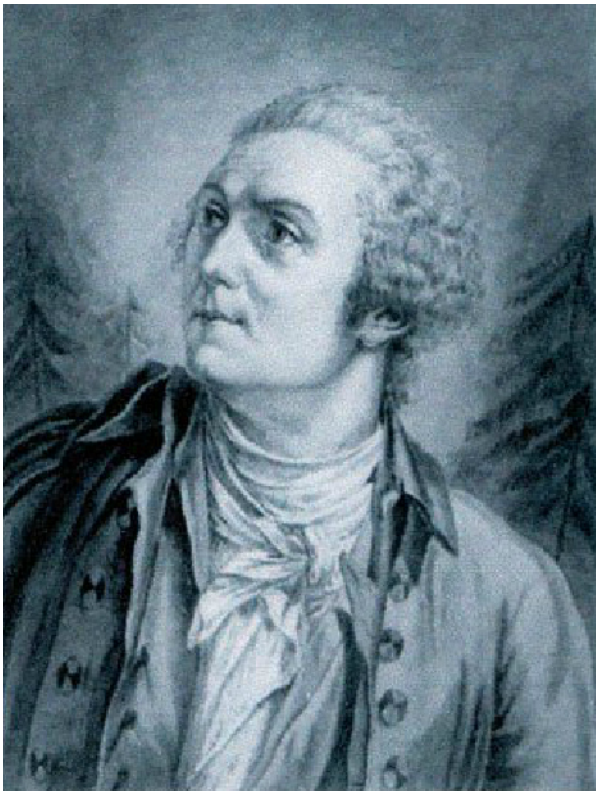
À noter qu'à l'époque, de Saussure utilise l'échelle de température dite de Réaumur, conçue en 1731 par un inventeur français du même nom. Le degré R valant 1,25 degré Kelvin ou Celsius, et avec le même degré O du point de congélation de la glace, il aura atteint dans sa caisse une température maximale de 87,7 °R x 1,25 = 109,6 degrés C. Notre physicien suisse parvient à prouver avec sa « boîte chaude » que pour des conditions identiques d'ensoleillement, on observe une même élévation de température intérieure. Le rayonnement solaire est donc indépendant de l'altitude.

Nous avons bien là l'ancêtre de nos capteurs solaires modernes, qu'ils utilisent l'eau ou l'air comme fluide caloporteur d'ailleurs. On retrouve sans surprise le vitrage, le fond noir absorbant et l'isolation thermique de l'ensemble.

Cette démonstration plutôt expérimentale sera complétée d'une manière plus scientifique par Joseph Fourier, bien connu pour ses travaux mathématiques. Nous nous intéressons plus à son mémoire paru en 1824 sous le titre « remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires ». Fourier reprend l'idée de H.-B. de Saussure, mais se place au niveau d'une échelle plus vaste, intégrant la terre entière, l'atmosphère et les océans. Les formulations sont plus précises encore, et l'on devine dans ses lignes les notions fondamentales de ce que nous appelons aujourd'hui l'effet de serre. En parlant de l'héliothermomètre, il écrit : « (…) La théorie de cet instrument est facile à concevoir. Il suffit de remarquer :

1 – que la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est point dissipée immédiatement par le renouvellement de l'air ;

2 – que la chaleur émanée du Soleil a des propriétés différentes de celles de la chaleur obscure. Les rayons de cet astre se transmettent en assez grande partie au delà des verres dans toutes les capacités et jusqu'au fond de la boîte. Ils échauffent l'air et les parois qui le contiennent : alors leur chaleur ainsi communiquée cesse d'être lumineuse ; elle ne conserve que les propriétés communes de la chaleur rayonnante obscure. Dans cet état, elle ne peut traverser librement les plans de verre qui couvrent le vase ; elle s'accumule de plus en plus dans une capacité enveloppée d'une matière très peu conductrice, et la température s'élève jusqu'à ce que la chaleur affluente soit exactement compensée par celle qui se dissipe (…) »



H.-B. de Saussure

Joseph Fourier

Avec lui, le rôle du vitrage est quasiment élucidé, et la chaleur obscure représente bien entendu ce que nous appelons rayonnement infrarouge de nos jours. Le verre est donc transparent à la lumière solaire, et devient un obstacle pour le rayonnement calorifique IR. On voit bien que la température intérieure de la boîte, donc du capteur, résulte de l'équilibre entre la chaleur reçue et la chaleur émise ou perdue. La conception de nos capteurs est entièrement basée sur ce concept simple. L'effet de serre où l'atmosphère joue le rôle du vitrage est parfaitement compris ; les bases sont jetées pour une compréhension plus globale des phénomènes climatiques qui risquent de modifier quelque peu le climat terrestre dans les années à venir.

Quelques expérimentations…

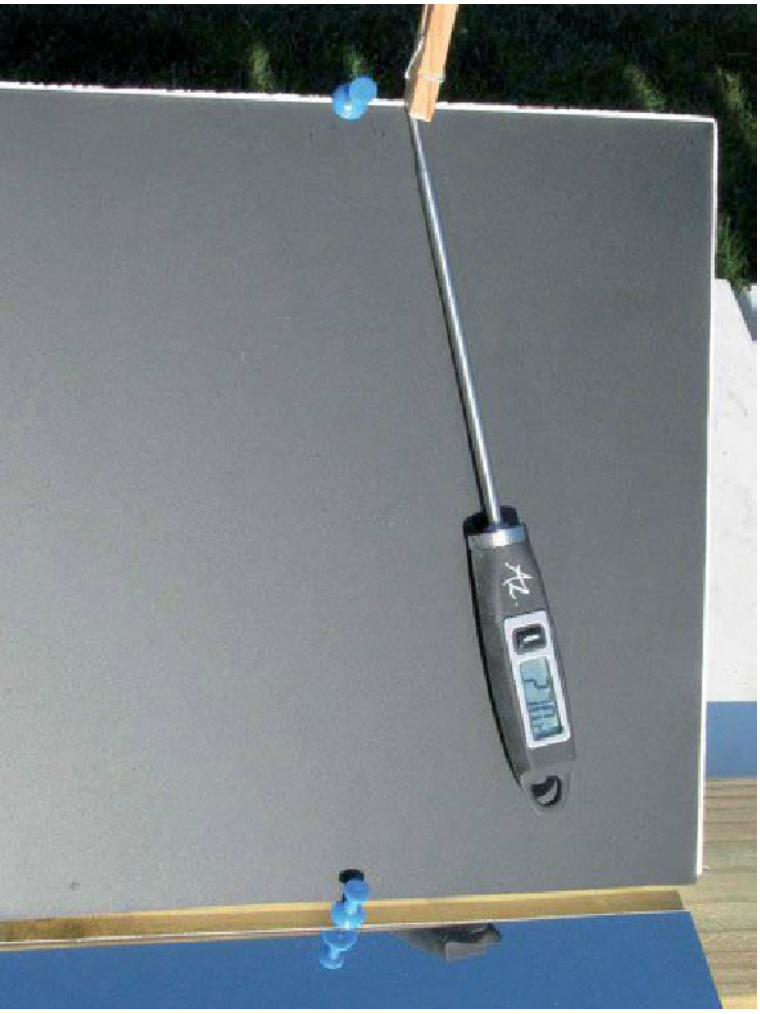
Pour mieux vous convaincre encore que l'énergie solaire est facile à capter et avec peu de moyens, nous nous sommes amusés à construire en quelque sorte une réplique de la boîte chaude de M. de Saussure, un jour d'hiver, alors qu'au petit matin la température extérieure était encore négative. C'était le 19 janvier 2011.

On disposera une table de jardin à l'extérieur orientée au sud, en veillant à pouvoir recevoir la lumière solaire dès le matin, et le plus longtemps possible dans la journée. On pourra faire pivoter ce plan de travail régulièrement pour capter le soleil le plus perpendiculairement possible (angle azimutal)…

Première expérience : découvrir le coefficient d'absorption

Absorbeur noir

Il s'agit de vérifier qu'une tôle très fine en aluminium poli, à la façon d'un miroir, capte bien moins de chaleur qu'une plaque d'aluminium identique, et de même surface, mais recouverte d'une très fine couche de peinture noire mate (peinture en bombe résistant à la chaleur). Les deux surfaces sont exposées côte à côte selon la même inclinaison, sur un support rudimentaire facile à déplacer. On pourra fixer une sonde de température sur le haut de chacune des plaques, pour relever la valeur atteinte au bout d'une heure environ. On constatera sans surprise que la surface noire conserve plus de chaleur, son coefficient d'absorption étant supérieur, un peu à la manière d'un corps noir ; nous aurons d'ailleurs l'occasion de préciser plus loin les caractéristiques d'un tel corps. L'air ambiant très froid capte très facilement les calories stockées dans l'aluminium et contribue à refroidir constamment nos absorbeurs, surtout par leur face arrière orientée au nord.



Isolation arrière

Deuxième expérience : limiter les pertes thermiques

Sur cette face arrière de la tôle peinte en noir, nous allons disposer un carré isolant rigide, en « styrofoam » nommé aussi polystyrène extrudé, réputé très bon isolant thermique. Il s'agit d'empêcher ou de réduire le plus possible le refroidissement du capteur, et la perte de l'énergie solaire captée. On constatera très vite une élévation substantielle de la température, qui laisse présager un rendement supérieur du dispositif ainsi constitué.

Troisième expérience : tester l'effet de serre

Une boîte fermée constituée de 4 côtés en bois, d'une face avant vitrée et d'une plaque arrière recevra la tôle noire et son isolant solidaire, pour une exposition prolongée au soleil. Nous veillerons à irradier la totalité de la surface de l'absorbeur noir en orientant convenablement l'ensemble. Un thermomètre « alimentaire » est inséré dans le haut de la boîte pour mesurer la température atteinte par l'air ainsi confiné. Après une heure d'exposition, on constate une très forte augmentation des degrés.

Absorbeur aluminium sous vitrage

Absorbeur ardoise sous vitrage

Quatrième expérience : choisir un matériau absorbeur naturel

Nous allons finalement remplacer le carré d'aluminium par la même surface d'une fine ardoise (3 mm d'épaisseur), oui, celle habituellement destinée à nos toitures, et dont la couleur noire et l'aspect rugueux devrait rivaliser avec les absorbeurs métalliques du commerce !

L'ardoise

Le site de Trélazé, à proximité d'Angers, est le plus grand producteur français d'ardoises de qualité, très recherchées pour la restauration des monuments historiques et des châteaux très nombreux en Pays de Loire, faut-il le rappeler.
Le poète angevin Joachim du Bellay écrivait déjà en 1558 :
(…) Plus me plait le séjour qu'ont bâti mes aïeux,
Que des palais Romains le front audacieux
Plus que le marbre dur me plait l'ardoise fine …
Plus mon Loir gaulois que le Tibre latin
Plus mon petit Liré, que le mont Palatin
Et plus que l'air marin la douceur angevine.
(Heureux qui comme Ulysse, a fait un beau voyage)

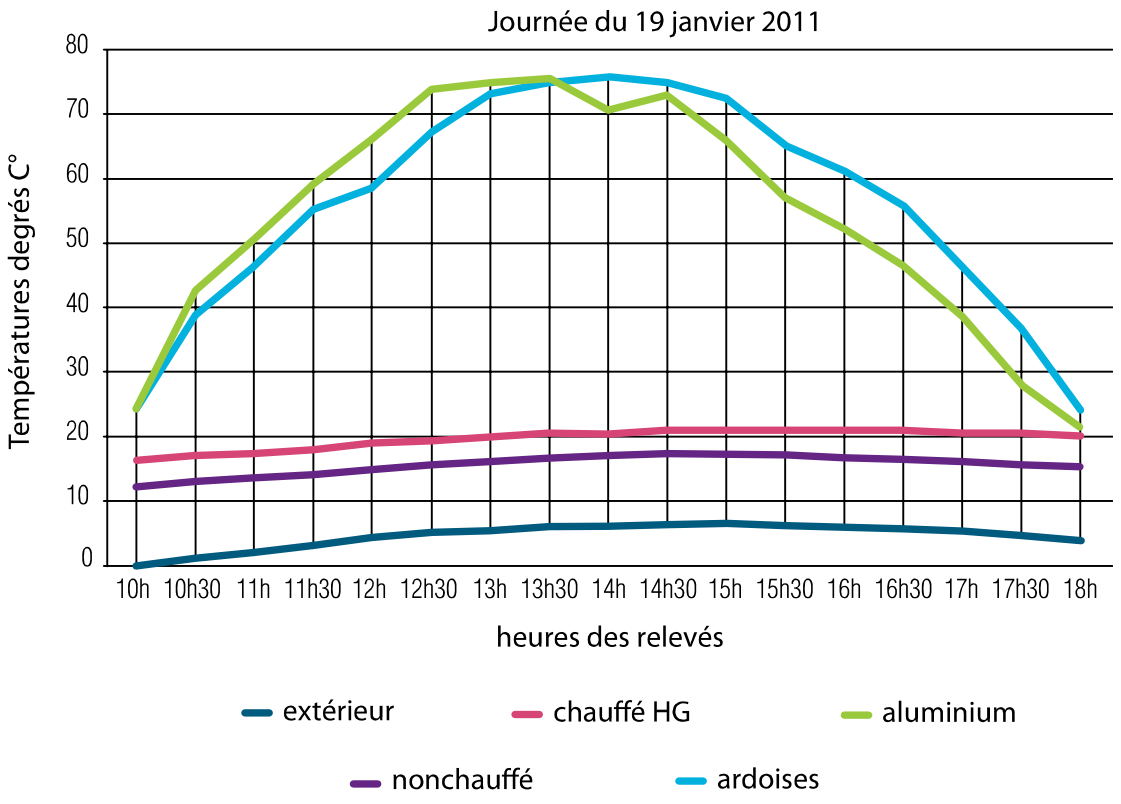
Il ne faudra pas bien longtemps non plus pour lire sur l'afficheur du thermomètre une température très élevée, 82,2 degrés C pour nous ce jour-là.
La preuve est faite que le matériau absorbeur pour nos capteurs aérothermiques pourra être réalisé à l'aide de surfaces d'ardoises, qui apporteront d'ailleurs une certaine inertie thermique ; l'ardoise est réputée pour stocker facilement la chaleur et la restituer progressivement plus tard. Nous vous présentons ci-après un graphique émanant des relevés de ce jour sur 2 capteurs vitrés opérationnels, l'un avec de l'aluminium noirci, l'autre avec un assemblage d'ardoises fines, d'une surface de 2 m^2 environ chacun.

	A	B	C	D	E	F
1	relevés	extérieur	chauffé	aluminium	non chauffé	ardoises
2	9h30	-0,5	16	15,8	11,4	10,8
3	10h	0,3	16,5	23,7	12,3	24,5
4	10h30	1,2	17	42,6	13,1	39
5	11h	1,9	17,5	50,5	13,6	46,5
6	11h30	3,1	18	59,1	14,3	55,3
7	12h	4,3	19	66,2	15	58,4
8	12h30	5,1	19,5	73,8	15,7	67,4
9	13h	5,4	20	75	16,2	73,3
10	13h30	5,9	20,5	75,5	16,6	75
11	14h	6,1	20,5	70,5	17,1	75,7
12	14h30	6,4	21	72,9	17,5	74,9
13	15h	6,3	21	66	17,3	72,4
14	15h30	6,1	21	57,1	17	65,1
15	16h	5,9	21	52,1	16,8	61,1
16	16h30	5,7	21	46,5	16,5	55,7
17	17h	5,3	20,5	38,6	16	46,4
18	17h30	4,5	20,5	28,1	15,7	36,9
19	18h	3,9	20	21,3	15,2	24,4

Remarque

Le capteur avec absorbeur en aluminium peint en noir est affecté à une pièce dont le convecteur est réglé à 15 °C, celui équipé avec des ardoises réalise le chauffage d'une pièce sensiblement identique, mais non chauffée.
Orientation plein sud, capteurs verticaux.
Colonne A : heure des relevés
Colonne B : température extérieure, ce 19 janvier 2011
Colonne C : température ambiante dans la pièce chauffée
Colonne D : température de l'air en sortie du capteur avec aluminium noir
Colonne E : température ambiante dans la pièce NON chauffée
Colonne F : température de l'air en sortie du capteur avec les ardoises

Et voici les courbes correspondantes :

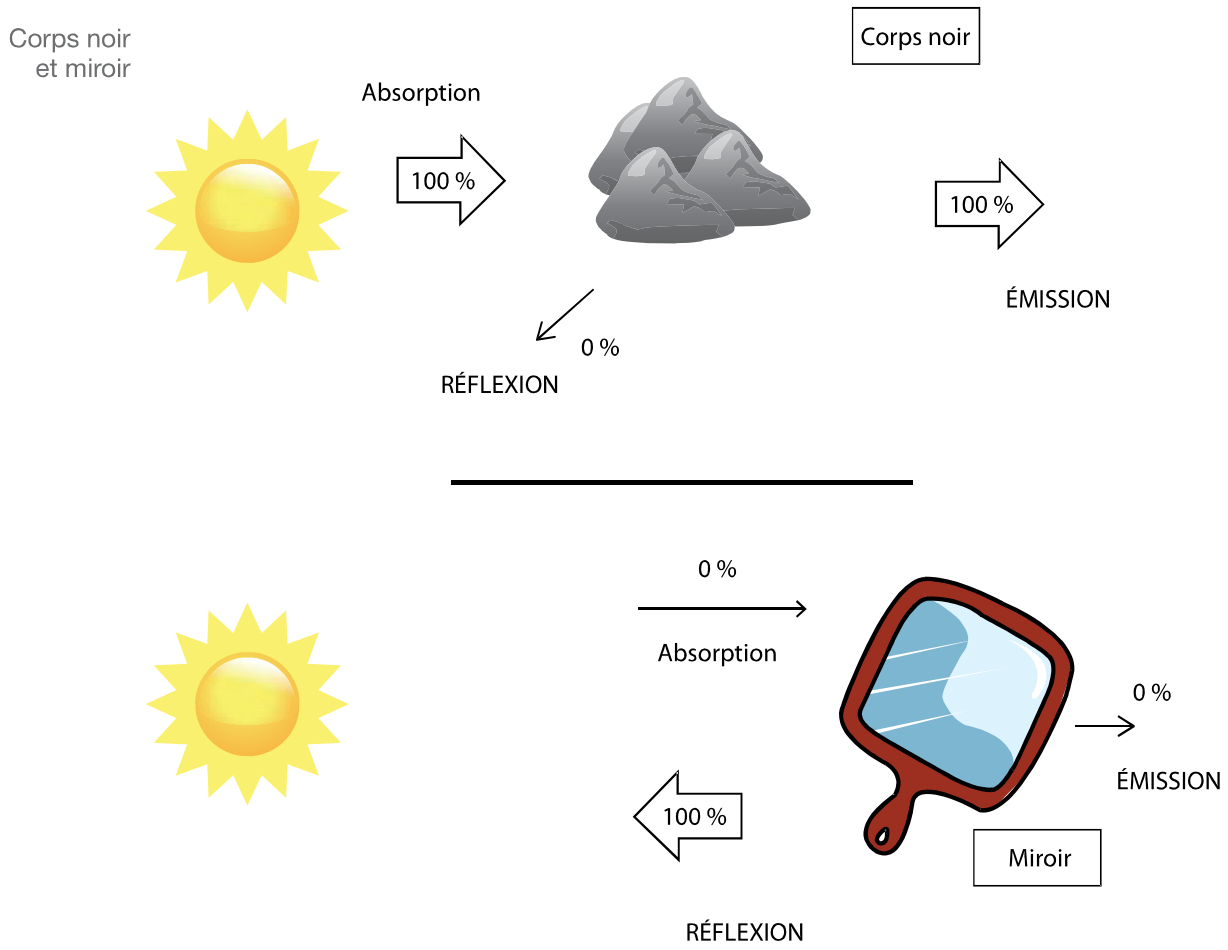


On constate sans peine une forte élévation de température sur les deux absorbeurs, malgré une température extérieure qui plafonne à 6,1 °C. L'aluminium est bien entendu plus rapide à réagir, mais l'ardoise atteint les mêmes valeurs maximales un peu plus tard et introduit donc un décalage bénéfique en soirée. À noter que vers 14 h un refroidissement partiel de l'aluminium par manque de soleil n'a pas d'incidence sur la température de l'ardoise qui reste « chaude » !

Notre capteur angevin va pouvoir prendre forme et solutionnera d'une manière économique et élégante le choix d'un absorbeur efficace. Nous éviterons également ainsi les risques d'émanations plus ou moins toxiques dans l'air réchauffé, risques liés à la confrontation de la forte chaleur produite avec les produits chimiques ou peintures utilisées pour noircir une surface d'absorption métallique.

Du corps noir à l'absorbeur

L'absorbeur est le cœur du capteur solaire, car c'est précisément lui qui doit emmagasiner la plus grande portion possible du rayonnement solaire qui lui parvient à travers le vitrage, convertir celle-ci en chaleur avec le moins de pertes possible dans le registre infrarouge. L'absorbeur idéal ou parfait serait ce que l'on nomme un corps noir, c'est-à-dire un matériau qui récolte toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit sous forme de lumière visible, sans en réfléchir aucune partie, tout en étant capable de réémettre la totalité du flux reçu. Et les longueurs d'onde du rayonnement reçu et du rayonnement émis ne seraient pas forcément les mêmes. Dans le cas de la lumière solaire visible, la restitution se ferait sous forme de chaleur, donc par des infrarouges. Un tel absorbeur reste fictif, et peu de matériaux présentent toutes les qualités requises.



Ainsi le corps noir parfait et le miroir parfait présentent des caractéristiques complètement opposées.
L'absorbeur idéal n'existant pas, on fait de nos jours de plus en plus souvent appel à des surfaces de captage dites « sélectives », c'est-à-dire qui présentent un coefficient d'absorption α élevé (de 0 à 100 %, l'idéal étant 100 %) et simultanément un coefficient d'émission ε le plus faible possible (de 0 à 100 %, l'idéal étant 0 %). De telles surfaces offrent des rendements élevés, moyennant par contre un coût de fabrication important. Les couleurs foncées sont naturellement privilégiées, et l'utilisation de la peinture aérosol noire reste une solution économique, mais peu recommandée quant aux pertes radiatives. Pourtant, il existe un produit à base de silicone, sous forme de spray, résistant aux hautes températures et offrant un résultat relativement satisfaisant (Thermalox).On utilisera le plus souvent des métaux sous forme de feuilles minces et légères, comme l'aluminium, le zinc ou l'acier, parfois avec des profils particuliers pour offrir plus de surface au soleil et piéger ses rayons.
Dans le tableau suivant, nous avons regroupé quelques matériaux ou procédés différents et leurs caractéristiques moyennes :

Matériau	Réflexion en %	Absorption en %	Émission en %
Tinox = cuivre sélectif	5	95	5
Black chrome	5	95	12 à 18
Spray Thermalox	4	96	52
Métal poli	70	30	10
Peinture Noire mate	10	90	95
Noir de fumée	4	96	90
Ardoise	11	89	97

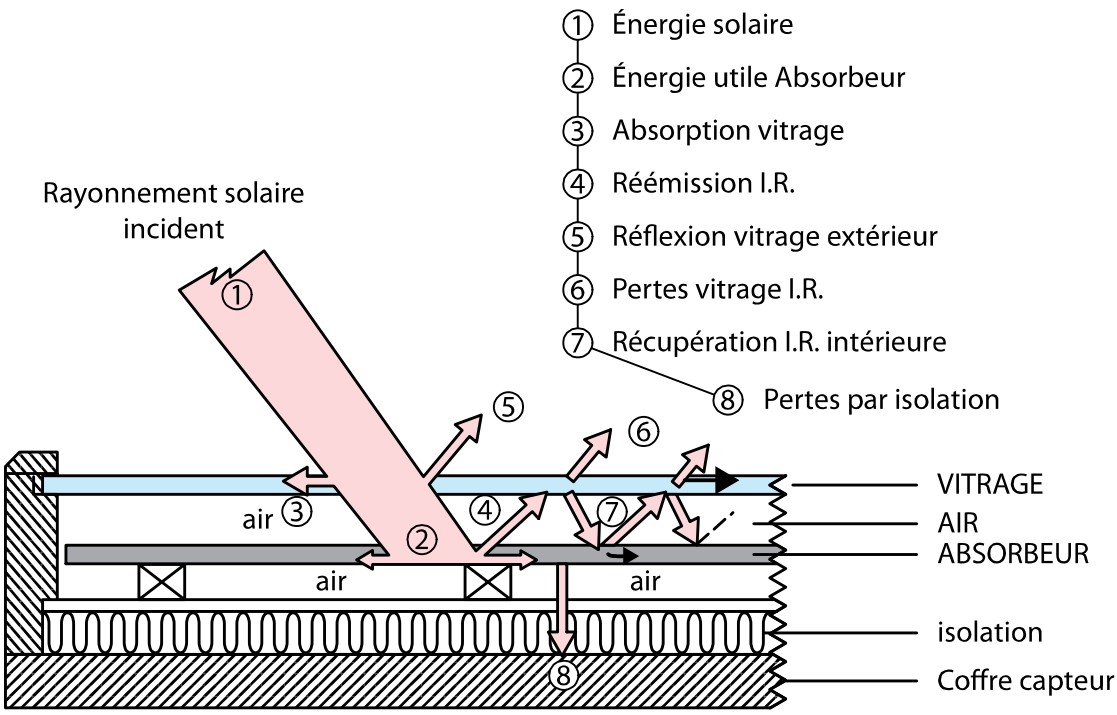
Noircir ou patiner des surfaces de zinc, d'acier ou d'aluminium exige de manipuler des produits chimiques souvent dangereux et nécessite parfois de mettre en œuvre des procédures complexes. Ayant opté pour un absorbeur en feuilles d'ardoises, nous n'aurons plus à nous préoccuper de sa couleur sombre naturellement. Malgré une valeur d'émissivité élevée (qui dépend également de la température, de la direction du rayonnement, de l'état de surface), l'ardoise de 3 mm semble un choix raisonnable, et sa masse ne représente pas une inertie de mise en température gênante, comme nous avons pu le constater lors de nos essais. En outre, ce décalage thermique devient un avantage pour restituer plus tardivement le soir les calories solaires captées dans la journée. Précisons également qu'il est plutôt bénéfique que la face arrière des ardoises soit fortement émissive, cette énergie étant renvoyée sur l'ardoise par un film réflecteur, renforçant ainsi l'effet thermique et accumulateur.

À propos de l'ardoise

Les terrains argileux et sédimentaires comprimés lors du plissement des montagnes produisent du schiste. Lorsqu'il peut être fendu en feuilles, on parle d'ardoise. Sa principale qualité est d'être facilement fissible, c'est-à-dire que l'on parvient à séparer cette roche selon le plan de clivage, perpendiculaire à celui des pressions subies lors de la formation de la roche. L'ardoise naturelle est non poreuse, inaltérable à l'air, imperméable à l'eau et dotée d'une durée de vie plus que centenaire parfois. Sa couleur peut varier selon la région de production, et va du gris clair au noir, en passant par des rouges sombres et des verts. On parle parfois du gris-bleu de l'ardoise. Celle de Trélazé présente une belle teinte noire, compatible avec une absorption solaire optimale. Ne l'appelle-t-on pas l'or noir de l'Anjou ?

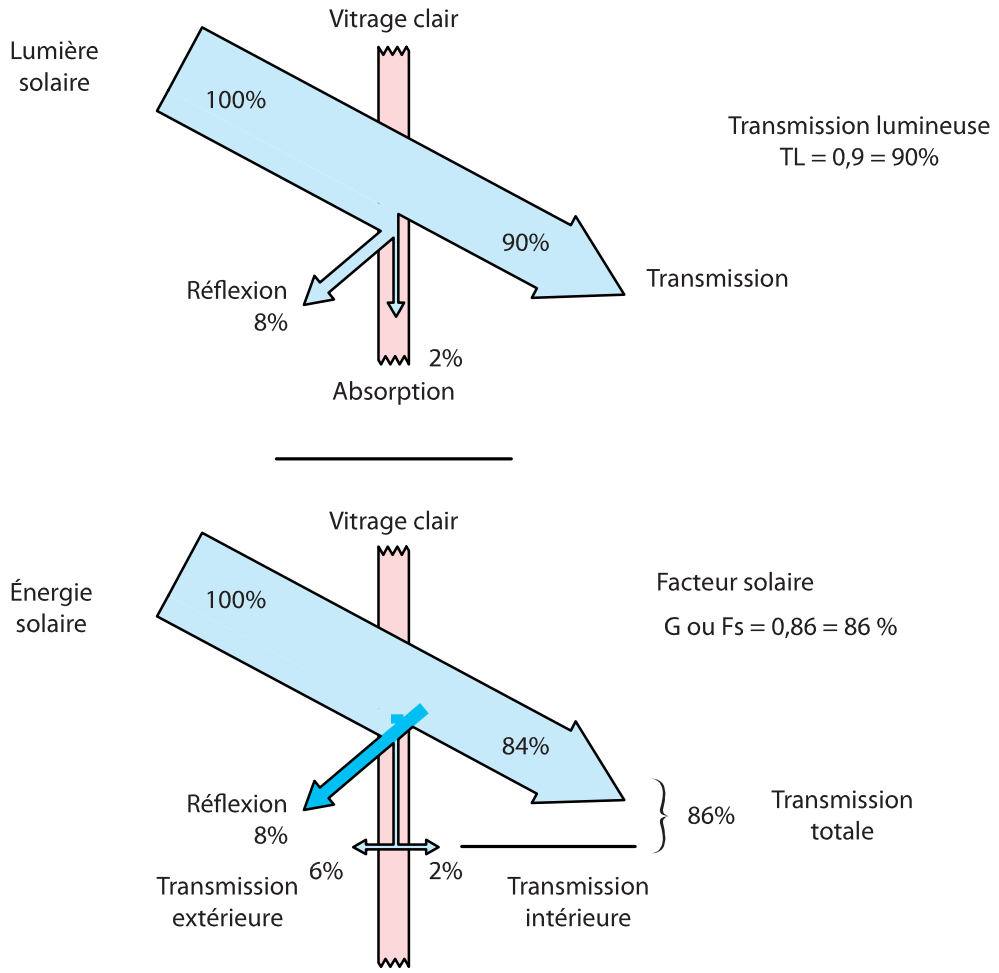
Soleil et vitrage

L'énergie solaire nous parvient principalement sous forme de rayonnement visible, et le vitrage du capteur plan se doit donc d'être le plus transparent possible pour permettre à cette lumière d'atteindre au mieux l'absorbeur situé juste derrière lui. Mais ce n'est pas là sa seule fonction, car outre sa transparence, une autre propriété intéressante du verre consiste à être quasiment opaque au rayonnement infrarouge, celui produit par l'échauffement de



Pertes dans le capteur plan

l'absorbeur noir, du fait de la longueur d'onde plus grande. C'est le phénomène de l'effet de serre observé précédemment et connu depuis fort longtemps. Il est mis à profit dans tous les capteurs solaires vitrés, qu'ils soient à air ou à eau d'ailleurs. Le verre est donc bien un véritable piège à chaleur. Ce processus complexe permet facilement d'obtenir des températures élevées, dont le fluide liquide peut réchauffer indirectement un ballon d'eau chaude sanitaire, soit un chauffage à basse température par l'intermédiaire d'un plancher chauffant adapté (PSD). On parvient également à provoquer l'échauffement de l'air pour le séchage ou le chauffage direct des pièces équipées de tels capteurs aérothermiques. Il va sans dire qu'une source d'appoint est indispensable, pour les journées sans soleil, et du soir au matin en l'absence de stockage de cette énergie calorifique solaire.
Le bilan thermique simplifié du capteur solaire vitré laisse entrevoir des pertes diverses, aussi bien dans le rayonnement visible que dans l'infrarouge. La portion d'énergie réellement captée par l'absorbeur donne une idée du rendement de cet ensemble.
Un vitrage transparent ou clair laisse passer une partie importante de la lumière présente sur sa face exposée au soleil. On parle dans ce cas de la transmission lumineuse ou TL. Pour un simple vitrage tout ordinaire d'une épaisseur de 4 mm, on peut espérer récupérer



Transmission lumineuse et facteur solaire

90 % de la lumière reçue, mais plus encore dans le cas de vitrages spéciaux, à faible teneur en oxydes de fer (jusqu'à 99 % selon les fournisseurs). On peut imaginer souhaiter réduire la quantité de lumière utile dans une véranda ou une pièce très éclairée au sud, en optant pour un vitrage réfléchissant (protection solaire). La transmission lumineuse peut descendre autour de 38 %, et même moins encore dans le cas d'un double vitrage. Dans le cas de notre capteur à air, ce ne sera pas justifié, et c'est plutôt la valeur du facteur solaire FS ou g qui nous importe, c'est-à-dire la part d'énergie qui vient atteindre l'absorbeur. Cette valeur est différente de celle de la transmission lumineuse, et reste souvent plus faible. On donne par exemple 85 % pour le verre de 4 mm pris en exemple plus haut. Il n'est pas forcément judicieux de faire usage sur un capteur solaire d'un double vitrage, souvent plus coûteux, plus lourd, plus encombrant, et dont le facteur solaire global risque également d'être moins bon, avec pour seul avantage de réduire quelque peu les déperditions thermiques.

Du fait de l'utilisation d'une grande surface d'ardoises comme absorbeur, une certaine inertie thermique est inévitable et même bénéfique en soirée. Toutefois, dans le cas d'un verre ordinaire, un sérieux risque de casse subsiste, lorsqu'une différence de température égale ou supérieure à 30 °C se présenterait entre les 2 faces du vitrage ! Des ardoises à plus de 75 °C à l'intérieur et une averse de pluie subite sur l'extérieur du capteur auraient vite fait de provoquer des tensions internes et occasionneraient le bris du verre. Sur les conseils d'un professionnel, nous avons donc mis en œuvre du verre trempé pour équiper tous nos capteurs. Le verre trempé (ou verre sécurit) a fait l'objet d'un traitement thermique spécial : il est chauffé **après** découpe aux dimensions requises à plus de 600 °C, avant d'être refroidi très rapidement par des jets d'air plus froid, pour provoquer des efforts de compression dans les couches extérieures du verre. Ce nouveau matériau possède une résistance à la casse par flexion d'environ 200 N/m^2 pour seulement 40 N/m^2 pour un verre simple d'épaisseur identique. Il est donc plus résistant aux chocs. Il résistera également à des variations de températures de 200 °C, en supportant une température maximale de 250 °C. Sa densité diminue, mais il ne sera plus possible ni de le couper, ni de le percer au risque de provoquer sa casse. De plus, ses bords sont souvent biseautés pour des raisons de sécurité. En cas de brisure, il se fragmente en de nombreux petits morceaux non tranchants. Ses propriétés lumineuses (TL) et énergétiques (FS) sont conservées et identiques à celles du verre ordinaire.

Pour des verres trop fins, moins de 3 mm d'épaisseur, la trempe thermique n'est guère conseillée ; on procède dans ce cas à une trempe chimique (bain salin à 400 °C pendant 24 heures), plus onéreuse et réservée à des verres spéciaux.

En remplacement du verre trempé, on pourra également faire usage d'une plaque de polycarbonate alvéolaire, qui présente quelques caractéristiques intéressantes : grandes dimensions, poids relativement léger, découpe facile, transmission lumineuse satisfaisante (moyenne en teinte claire 65 %). Sa résistance mécanique et surtout thermique est bien supérieure à celle du verre, en raison des espaces d'air aménagés entre les parois multiples. Des points négatifs subsistent, comme une épaisseur plus importante, et une stabi-

lité dans le temps face aux UV malgré les traitements (jaunissement) avec un risque de fragilité accrue au fil des années. L'aspect esthétique reste un facteur d'appréciation personnel que nous ne jugerons pas ici.

Polycarbonate alvéolaire

Pour notre réalisation, et compte tenu des températures élevées obtenues dans le capteur, il nous a fallu utiliser en face arrière un matériau isolant capable de supporter à la fois les 90 °C obtenus et ne pas être sensible à l'humidité puisque installé à l'extérieur. La laine de verre et la laine de roche ne pourront convenir étant hydrophiles, et le polystyrène blanc classique non plus puisque commençant à fondre vers 80 °C. Nous avons choisi une bonne épaisseur de styrofoam rigide encore appelé polystyrène extrudé, facile à découper et à poser. De même, le joint d'étanchéité encadrant le vitrage est un élastomère adhésif souple en caoutchouc EPDM, avec une bonne tenue en température entre -40 °C et + 100 °C, et un excellent vieillissement.

L'aérogel de silice

Pour information, nous vous signalons l'existence d'un matériau révolutionnaire, issu des nanotechnologies, à savoir *l'aérogel de silice*. Il s'agit là du solide le plus léger au monde, avec seulement 3 grammes au litre, puisque composé à 99 % d'air. Il est capable de supporter jusqu'à 2000 fois sa propre masse, et est doté d'une conductivité ou capacité d'isolement exceptionnelle : en théorie 39 fois plus isolant que la laine de verre ! Ce matériau est semi-transparent, et devient même transparent dans le vide. On imagine sans peine ce produit en remplacement futur du vitrage de nos capteurs, s'il n'y avait pour l'heure un gros inconvénient, son prix exorbitant. Il restera encore longtemps dans le domaine de la science fiction, ou du moins réservé à la Nasa pour déjà équiper les combinaisons spatiales des cosmonautes. Plus d'informations sur le site : www.dotapea.com.

L'air, fluide caloporteur

Pour améliorer le rendement de notre insolateur, compte tenu des faibles caractéristiques thermophysiques du fluide caloporteur qu'est l'air, (il a en effet une capacité calorifique quatre fois moindre que celle de l'eau), nous avons développé **sous** l'absorbeur en ardoises un réseau d'obstacles ou chicanes, dont la fonction est de rallonger le parcours de l'air plus froid prélevé dans le bas de la pièce, et de le ralentir pour lui laisser le temps d'être plus longuement en contact avec la face chaude de l'absorbeur. Cet air réchauffé sera ensuite réintroduit dans le local en partie haute. Nous avons pu constater une très nette amélioration de l'échange thermique **air-ardoise**, et d'autant plus si la circulation du fluide se fait en convection forcée à l'aide d'un minuscule ventilateur en partie basse. À cet emplacement, il n'y aura aucun risque de destruction pour excès de chaleur ! Il est vrai que la thermocirculation naturelle de l'air sera fortement contrariée par les obstacles, mais pourra facilement être contrôlée grâce au débit variable du ventilateur dont il suffira de faire varier la vitesse par un dispositif électronique adapté (réglage PWM).

D'autre part, n'oublions pas que le captage de l'énergie calorifique solaire est d'autant plus efficace que la température de l'absorbeur est plus basse. Il s'agira de trouver un juste milieu entre ces exigences apparemment contradictoires.

Disposition des chicanes sous l'absorbeur

Orienter le capteur

Attention : la pose de capteurs solaires sur l'extérieur d'un bâtiment existant doit faire l'objet d'une déclaration préalable adressée en mairie (article R421-7 du code de l'Urbanisme). Cette installation s'apparente en effet à une modification de l'aspect extérieur, au même titre qu'un ravalement de façade ou que la pose de panneaux photovoltaïques d'une puissance crête inférieure à 3 kW. Un locataire peut également faire cette démarche, en accord bien évidemment avec son propriétaire. Après dépôt des pièces constituant le dossier (plan de situation, plan de masse, schéma des façades équipées, matériaux utilisés) il faudra attendre une réponse en principe favorable dans un délai de 1 mois. Si vous résidez dans un secteur protégé (monument historique, site, réserve, parc naturel), on devra s'attendre à des consultations, avis, ou exigences particulières.
La position de l'insolateur sur votre habitation conditionne directement la quantité de chaleur produite et par là la rentabilité du dispositif. Il est clair que seule la production hivernale nous intéresse dans le cas du chauffage des locaux. Aucune contre-indication non plus pour les premiers froids d'automne et les dernières gelées du printemps. Ce ne serait pas le cas d'une application destinée au seul séchage de produits agroalimentaires, qu'il conviendrait d'étudier plus précisément en fonction de la saison de production. Il pourrait même être judicieux dans ce cas de disposer les capteurs sur le toit, pour maximiser l'exposition aux rayons solaires, qui délivreront une plus forte puissance à la verticale de la surface vitrée. En raison de l'encombrement et de la masse d'un capteur solaire (plus de 50 kg), il n'est sans doute pas simple non plus d'envisager un suivi solaire azimutal régulier d'est en ouest.
Dans l'idéal pour notre application de chauffage des pièces d'habitation, une position verticale sera adoptée, avec pour avantage une simplicité de pose et une atténuation automatique de l'ensoleillement lorsque le soleil sera plus haut en été, toujours en raison de l'angle d'incidence des rayons solaires sur le vitrage et sur l'absorbeur. Si vous avez la chance de disposer d'une façade orientée plein sud, il ne vous devrait pas être trop compliqué de trouver entre les fenêtres des emplacements verticaux propres à accueillir un ou plusieurs insolateurs aérothermiques. En principe, on attribue un capteur à chaque pièce, avec une puissance espérée d'environ 1000 W par mètre carré exposé. Ne perdez pas de vue non plus que déplacer de l'air sur une distance de plusieurs mètres exigera des conduits isolés assez encombrants, occasionnant quelques pertes en charge.
Nous avons vu précédemment que la course du soleil est assez réduite en hiver et si votre emplacement présente des masques ou obstacles à l'est (arbres, bâtiments, relief) il sera profitable d'orienter les panneaux plus en direction de l'ouest, sachant que la production sera plus conséquente l'après-midi. Chaque implantation mérite une longue réflexion, au fil des saisons, pour déterminer l'emplacement optimal des capteurs. Des contraintes architecturales peuvent compliquer votre choix, mais il ne faudra jamais négliger l'exposition idéale ou s'en rapprocher le plus possible pour un fonctionnement satisfaisant.

1/2

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

Déclaration préalable

à la réalisation de constructions et travaux non soumis à permis de construire portant sur une maison individuelle et/ou ses annexes

cerfa
N° 13703*01

Formulaire à utiliser si :

- Vous réalisez des travaux sur une maison individuelle (extension, modification de l'aspect extérieur, ravalement de façade...).
- Vous construisez une annexe à votre habitation (piscine, abri de jardin, garage...).
- Vous édifiez une clôture.

Pour vérifier que vos travaux sont bien soumis à déclaration préalable, vous pouvez vous reporter à la notice explicative ou vous renseigner auprès de la mairie.

Cadre réservé à la mairie du lieu du projet

D P ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___
Dpt Commune Année N° de dossier

La présente demande a été reçue à la mairie

le ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ *Cachet de la mairie et signature du receveur*

Dossier transmis : ☐ à l'Architecte des Bâtiments de France
☐ au Directeur du Parc National

1 - Identité et coordonnées du déclarant

• Madame ☐ Monsieur ☐
Nom : ..... Prénom : .....

• **Adresse :** Numéro : ..... Voie : .....

Lieu-dit : ..... Localité : .....

Code postal : ___ ___ ___ ___ ___ BP : ___ ___ ___ Cedex : ___ ___ Pays : .....

Téléphone *(facultatif)* : ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

Adresse électronique *(facultatif)* : ..... @ .....

☐ **J'accepte de recevoir par courrier électronique les documents transmis en cours d'instruction par l'administration à l'adresse ci-dessus.** J'ai pris bonne note que, dans un tel cas, la date de notification sera celle de la consultation du courrier électronique ou, au plus tard, celle de l'envoi de ce courrier électronique augmentée de huit jours.

2 - Le terrain

Le terrain est constitué de l'ensemble des parcelles cadastrales d'un seul tenant appartenant à un même propriétaire.

• **Références cadastrales : section et numéro**[1] (si votre projet porte sur plusieurs parcelles cadastrales, veuillez indiquer tous les numéros de parcelles) : .....

• **Adresse du terrain**

Numéro : ..... Voie : .....

Lieu-dit : ..... Localité : .....

• **Superficie du terrain (en m²) :** .....

Si ce terrain est situé dans un lotissement, cochez cette case ☐

Cette donnée, qui est facultative, peut toutefois vous permettre de faire valoir des droits à construire ou de bénéficier d'impositions plus favorables.

Pour les déclarations portant sur un lotissement ou une division foncière non soumis à permis d'aménager, veuillez utiliser le formulaire cerfa n° 13702*01.
Pour les déclarations portant sur d'autres constructions et travaux non soumis à permis de construire, veuillez utiliser le formulaire cerfa n° 13404*01.

1 En cas de besoin, vous pouvez vous renseigner auprès de la mairie

Une augmentation de la surface des capteurs peut compenser une orientation moyenne, et une intégration au bâti est parfois nécessaire malgré un rendement plus réduit.
Dans le tableau suivant on trouvera une indication sur les coefficients réducteurs qui s'appliquent sur le rendement en fonction de l'implantation choisie. L'idéal sera bien entendu le sud, avec une inclinaison du capteur selon la latitude du lieu si la pose verticale n'est pas retenue.

Tableau réalisé pour le solstice d'hiver, latitude Cholet 47°, 04 minutes

Orientation du capteur sur la facade	Angle azimutal	Inclinaison capteur selon latitude rendement en %	Capteur vertical	Remarques
sud est	- 45°	71	67	à éviter
	-30°	87	82	moyen
	-20°	94	88	moyen
	-15°	96	90	acceptable
	-10°	98	92	correct
	-5°	99	93	correct
plein sud	0°	max = 100	94	optimal
	+5°	99	93	correct
	+10°	98	92	correct
	+15°	96	90	acceptable
	+20°	94	88	moyen
	+30°	87	82	moyen
sud ouest	+45°	71	67	à éviter

PARTIE 2

RÉALISATION d'un capteur solaire à air

Construire un capteur à air

L'adjonction d'un ou plusieurs insolateurs à air chaud ne transformera pas votre habitation actuelle en maison bioclimatique, loin s'en faut. Ce type de construction propose une architecture adaptée aux conditions climatiques, à l'environnement extérieur, avec une orientation optimale compte tenu des contraintes d'urbanisme parfois contraignantes, au choix de matériaux naturels et à des solutions d'économies d'énergie multiples. L'isolation performante d'un local (absence de ponts thermiques), son étanchéité à l'air et une ventilation contrôlée performante sont autant de points préalables à l'utilisation de l'énergie solaire. On dit souvent, avec raison, que l'énergie la moins polluante est celle que l'on ne consomme pas.

Notre proposition consiste **seulement à soulager durablement et à moindre coût** la part du chauffage, pour diminuer autant que faire se peut la facture énergétique. Les calories gratuites du soleil seront soustraites des sources d'énergie utilisées par ailleurs. Et une réduction très significative des dépenses de chauffage est justement possible par la mise en service optimisée de quelques capteurs solaires à air chaud.

Nous n'aborderons pas en détail le cas particulier du mur Trombe, basé sur l'accumulation des calories solaires dans un gros volume de béton peint en noir, placé derrière une vitre orientée au sud. Un mur de 40 centimètres d'épaisseur peut en principe apporter un déphasage d'une dizaine d'heures. Mais ce concept de chauffage passif a pour inconvénient les déperditions thermiques nocturnes (isolation à prévoir le soir), et les risques de surchauffe en été en cas d'absence de protections solaires efficaces.

La mise en place d'un aérogénérateur vertical unique par pièce nous semble plus simple à réaliser dans le cadre d'une autoconstruction sur un bâtiment existant. Une exposition plein sud, à plus ou moins 20° vers l'est ou l'ouest, dégagée de tout obstacle en hiver est indispensable. Par contre, un ombrage estival dû à un feuillage est souhaitable si l'on souhaite réduire l'échauffement inutile des capteurs aux beaux jours. Nous aborderons plus loin les solutions de brise-soleil, stores, rideaux et mise à l'air libre du capteur au moyen d'une ouverture haute.

Une surface de capteur de 2 m^2 environ pour une pièce de hauteur normale et de 12 à 15 m^2 semble une valeur correcte, qu'il sera aisé d'adapter selon la latitude et l'irradiation moyenne. Nous proposons un capteur aux dimensions utiles (absorbeur) approximatives de 2 m de haut pour 1 m de large. Les dimensions maximales d'un vitrage trempé de 5 mm sont à considérer, ainsi que sa masse éventuelle lors de l'installation.

Ombrage estival

À propos du pin Douglas

Le pin d'Oregon ou pin Douglas (pseudo tsuga) a une densité de 0,45 à 0,65. Ce bois résineux de fil serré, à grain moyen, est assez tendre, et se travaille facilement. Originaire d'Amérique du Nord, et introduit chez nous en 1842, le massif français de pin Douglas représente plus de 400000 hectares ; il constitue une ressource de plus en plus recherchée pour la charpente et la menuiserie, avec des sujets exploitables après plus de 50 ans. Il a été très utilisé pour le reboisement dans le Massif central, le Limousin et le Morvan. Sa couleur orange-rouge est très appréciée, mais également ses propriétés mécaniques et sa durée de vie, étant imputrescible à cœur et peu sensible aux insectes.

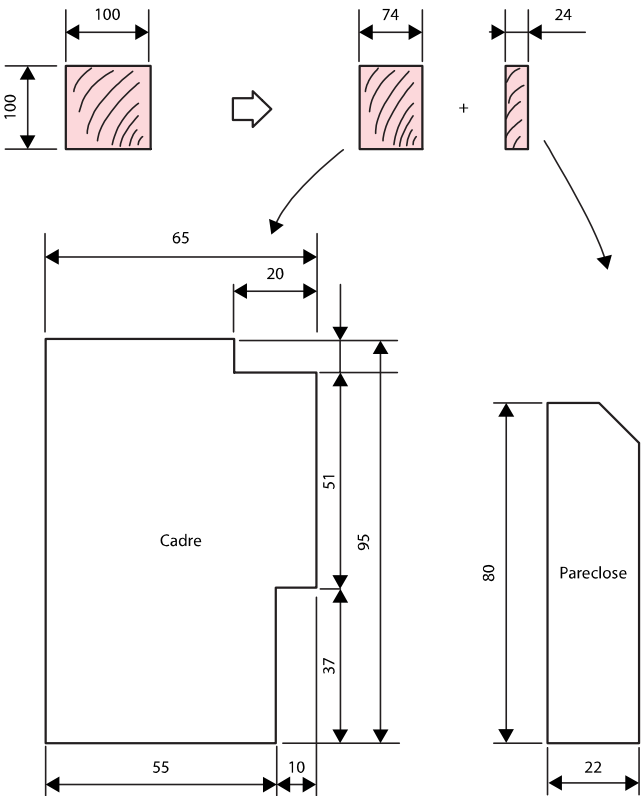
Le cadre du capteur

Placé à l'extérieur, il a pour fonction de recevoir tous les éléments (absorbeur, vitrage, isolation, chicanes) tout en assurant sa fixation au mur et le raccordement aux conduits intérieurs, pour une très longue durée de vie, étant soumis aux aléas climatiques agressifs (soleil évidemment, pluie, froid, neige, grêle, vent). Bien conçu, ce capteur de type passif n'exige quasiment aucune maintenance, si ce n'est le nettoyage périodique du vitrage à l'extérieur.
Des tronçons de bois de charpente, brut de sciage, en pin Douglas naturel seront utilisés pour confectionner les côtés du cadre massif, alliant solidité et facilité d'usinage, avec une durée de vie exceptionnelle, même sans aucun traitement. Cette essence appelée parfois Pin d'Oregon est en effet réputée très durable et facile à raboter. C'est le bois principal de construction en Amérique du Nord, sans doute en raison de sa croissance spectaculaire et à des fûts très droits de 40 à 50 mètres pour un diamètre de plusieurs mètres.

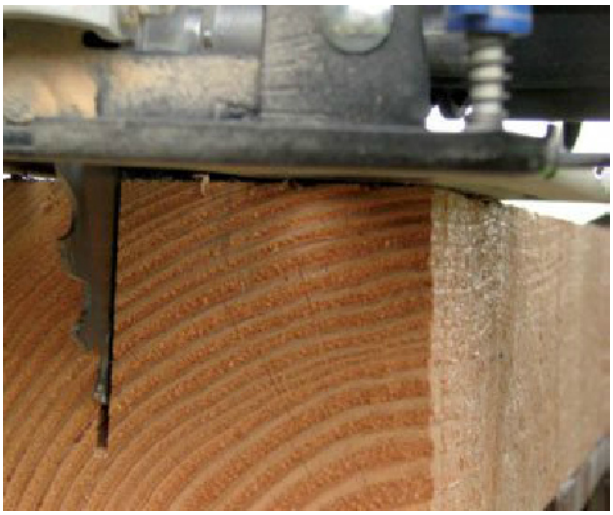
1. Préparation du bois

Pour la réalisation du cadre d'**un** capteur, il vous faudra disposer de 3 longueurs de 2,50 m de pin Douglas, brut de sciage, d'une section de 100 x 100 mm.
Par un sciage longitudinal, éventuellement en retournant le tronçon, on réservera à la fois les pare-closes et les profils du cadre, qu'il ne restera plus qu'à raboter, puis mettre en forme selon les dimensions de la figure suivante :

Bois de charpente Douglas, brut de sciage, classe III, 100 x 100 mm

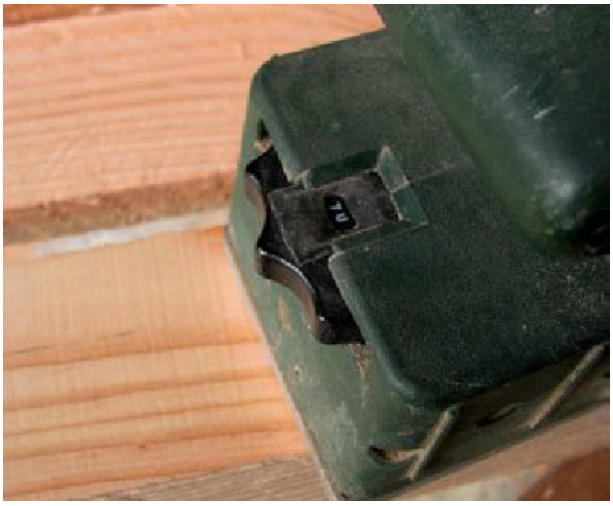


Dimensions du profil du cadre



Débit à la scie circulaire

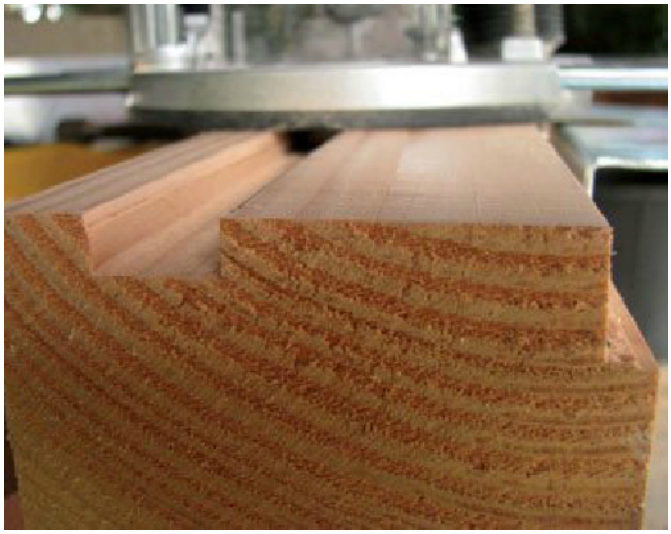
Raboter les éléments en procédant à des passes successives, régulières, par petites épaisseurs à la fois. Ne pas hésiter à finir par 1/10ème pour un aspect satisfaisant.



Mises aux dimensions du cadre avec le rabot électrique

Préparation de la pare-close, sciage puis rabotage

À moins de pouvoir disposer d'une machine à bois combinée, il faudra réaliser les feuillures et encoches diverses à l'aide d'une défonceuse portative. Un outil cylindrique adapté pourra usiner sans peine le bois tendre, mais toujours en procédant par plusieurs passes successives en profondeur et même en largueur. Veillez à bien régler la jauge de profondeur, utilisez un guide latéral et fixez convenablement la pièce de bois à travailler. Une vitesse d'avancement modérée évitera un échauffement excessif de l'outil et un aspect convenablement lisse de la zone rabotée.

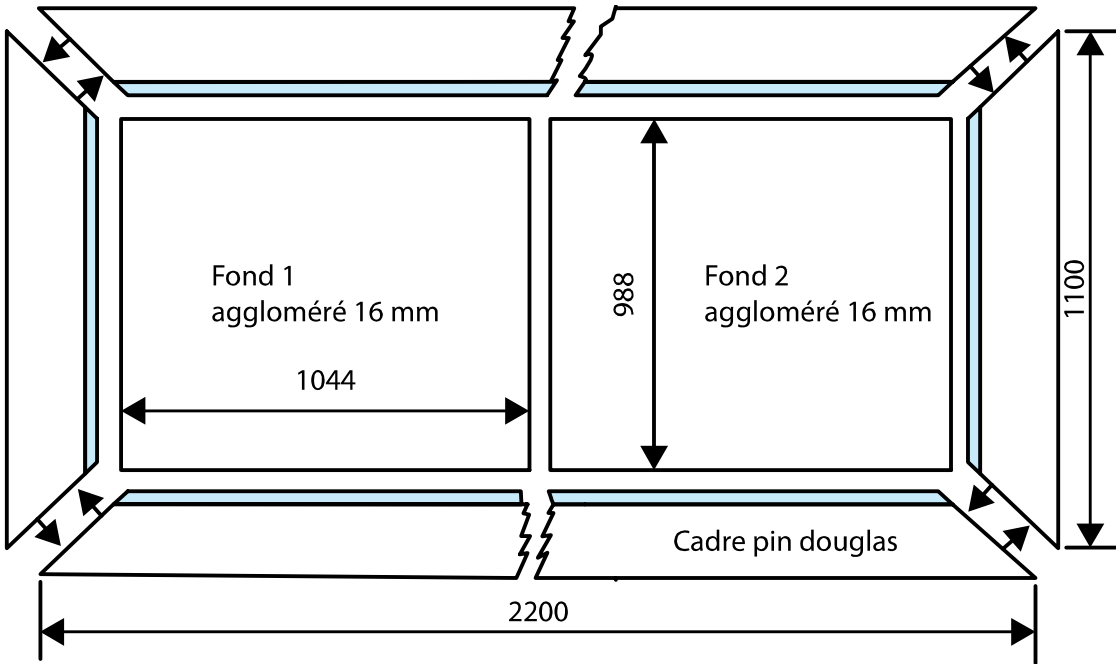


Usinage du profil du cadre

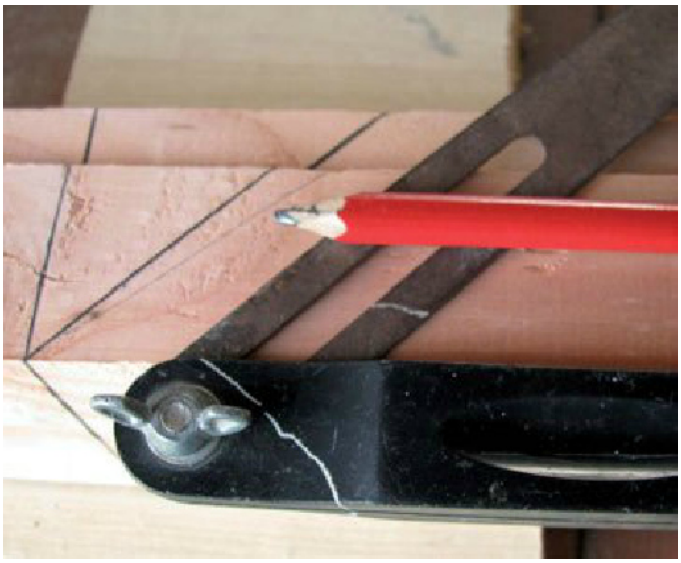
Le profil terminé et conforme à la figure de la page 56

2. Assemblage du cadre

À partir des 3 éléments usinés précédemment, l'étape suivante consiste à débiter les 4 tronçons du cadre formant l'ossature de notre capteur. À la manière d'un gigantesque tableau en somme, puisqu'une coupe en onglet traditionnelle permettra un assemblage solide, selon les dimensions indiquées sur la figure ci-dessous. Avec une longueur de bois brut de 2,5 m, il sera possible d'atteindre une taille maximale hors tout de 2,5 m x 1,25 m environ. La surface d'absorbeur sera dans ce cas de 2,65 m^2 avec un vitrage trempé de 5 mm légèrement plus grand, afin de permettre sa fixation au moyen des pare-closes et une étanchéité par deux joints adhésifs EPDM.



Dimensions et assemblage du cadre



Tracé et coupe à 45° des 4 éléments à l'aide d'une scie à onglet précise

Dans le petit tronçon du haut, on tracera soigneusement une ouverture oblongue en prévision d'une mise à l'air libre du capteur en période estivale, ouverture obturée au moyen d'une plaque étanche facilement démontable. Il sera sans doute plus commode de pratiquer cette découpe à l'aide d'un foret à bois assez large (Ø 35 mm), par des trous tangents, puis de terminer à la râpe ou à la scie-sauteuse. Cette opération est plus aisée à réaliser avant assemblage du cadre !

Usinage de l'ouverture haute pour ventilation estivale

Assemblage des éléments après équerrage, serrage prévu par sangle à cliquet

Collage (colle polyuréthane spéciale extérieur) et mise en place de chevilles en bois, diamètre 8 mm

Le cadre terminé, en cours de séchage

Les traces de colle fraiche s'enlèvent à l'acétone (procéder à l'extérieur et éviter d'inhaler). On peut constater une expansion du trop plein de la colle après séchage, qu'il faudra ôter à l'aide d'une lame de cutter, avant ponçage. Les tasseaux cloués maintiennent un équerrage correct, après vérification de l'égalité des 2 diagonales.

3. Équipement, finition du cadre

Après quelques heures de séchage, il convient d'installer dans le fond du cadre les deux panneaux identiques en aggloméré de 16 mm, pointés, le temps de laisser agir un filet de colle dans la feuillure de 10 mm, ainsi qu'entre les 2 surfaces.

Mise en place du fond en agglo de 16 mm

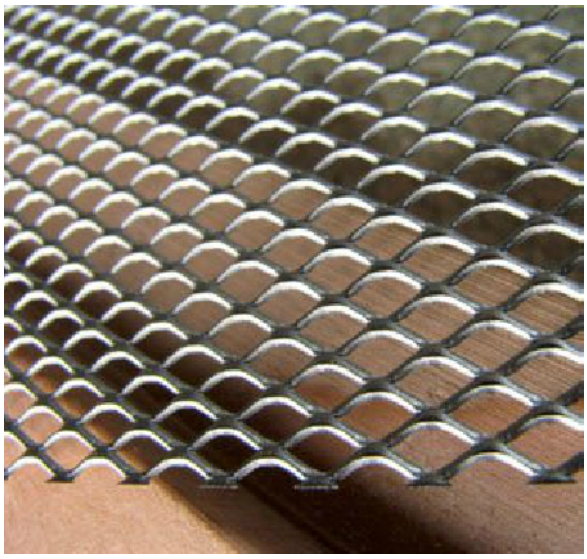
On pourra ensuite couper l'excédent des chevilles en bois à l'aide d'une scie d'encadreur ou d'une lame de scie à métaux sans sa monture. Il faut procéder encore au ponçage de l'ensemble du cadre avec une ponceuse vibrante et quelques feuilles d'abrasifs de plus en plus fins.

Ponçage, et aspect du cadre côté absorbeur

L'isolation arrière sera réalisée par collage de quelques plaques de polystyrène extrudé, d'une épaisseur de 20 mm, ce produit étant disponible aux dimensions de 1250 x 600 mm. On utilisera un mastic-colle adapté, en quelques plots répartis sur l'agglo. À l'aide d'une cale de bois et d'un marteau caoutchouc on pourra « écraser » l'isolant sur la colle pour qu'il ne dépasse pas du cadre. On terminera par la mise en place d'une bande adhésive large sur les différents joints.

Isolation rigide arrière du capteur

Puis, on procède à la découpe et à la mise place d'un fin grillage de protection en métal déployé, dans l'espace intérieur du cadre, pour occulter l'ouverture prévue pour l'aération estivale. Une fixation par simple agrafage devrait suffire, suivie d'une couche de peinture en bombe noire, si possible résistante aux hautes températures. Cette couche de peinture est facultative si la grille en métal est sombre…



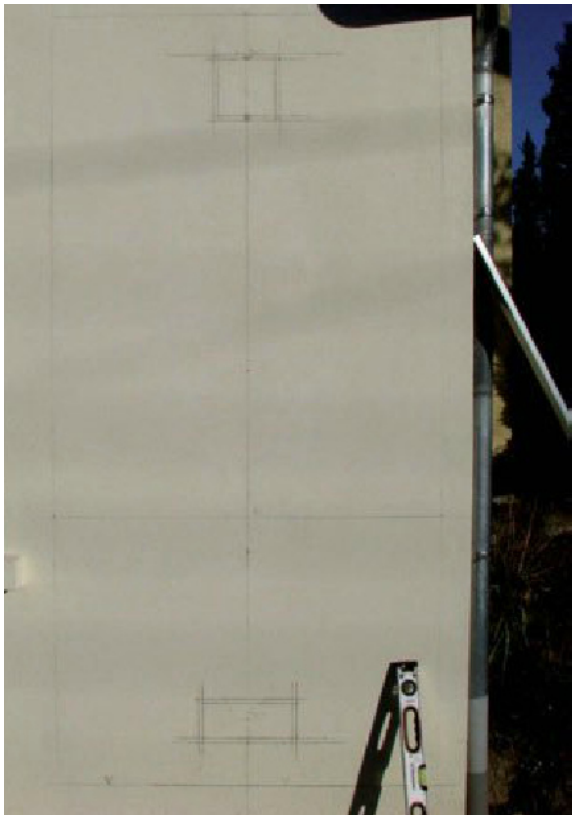
Mise en place du grillage de protection intérieur

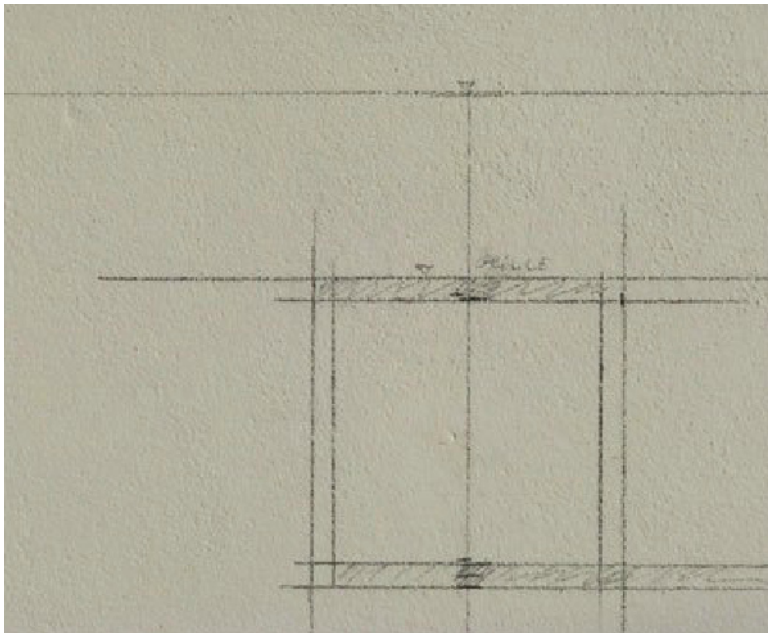
Un traitement colorant liquide sera appliqué sur l'ensemble du pin Douglas. On préfèrera un produit écologique si possible, et on procèdera au nettoyage des outils à l'eau. Éviter autant que faire se peut les lasures odorantes ou polluantes, susceptibles d'empoisonner durablement le volume de la pièce à chauffer. Le cadre de notre capteur est désormais prêt à être installé sur le mur qui doit l'accueillir, avant de recevoir l'absorbeur en ardoises et son vitrage indispensable. À ce stade, il pèse environ 40 kg. Il vous faudra donc sans doute de l'aide pour le déplacer.

Traitement colorant du bois,
et cadre prêt à poser

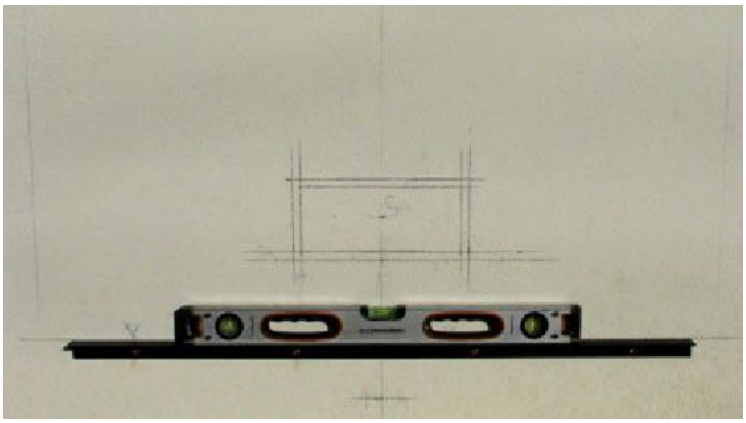
4. Fixations du cadre et conduits

L'emplacement du capteur étant défini, il s'agit de prévoir sa fixation au mur et la position exacte des conduits d'air haut et bas, qu'il faudra faire coïncider sur le fond de l'insolateur. Le poids non négligeable de l'ensemble, compte tenu des ardoises et du vitrage à ajouter, exige un support solide et discret. Pour le bas une cornière pleine de 30 x 30 mm, nous avons donc choisi de réaliser quelques perçages pour une fixation classique au mur (chevilles + tirefonds), sans oublier une couche de peinture antirouille. Deux équerres sur le haut suffiront, juste pour retenir le capteur et le plaquer au mur.





Tracé au mur du cadre et des
ouvertures à pratiquer

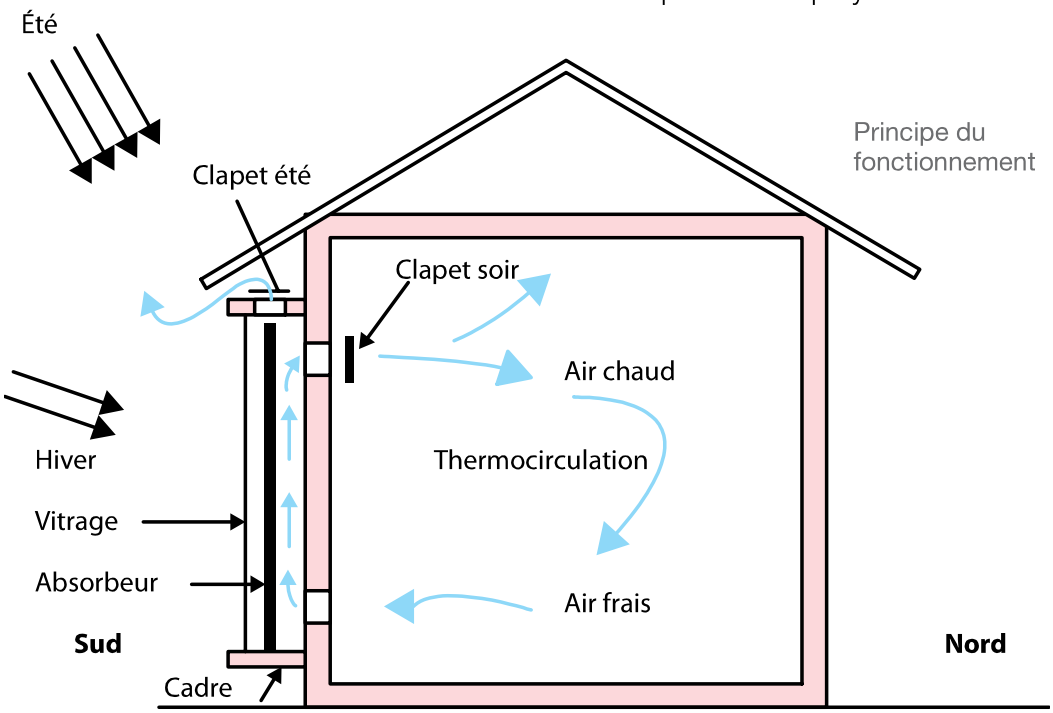


Cornière support basse

L'une des 2 équerres
de fixation haute

Préparation des ouvertures

Le principe du fonctionnement de notre insolateur repose sur le prélèvement de l'air frais de la pièce en position basse, air réchauffé au contact de l'absorbeur, et qui, par convection ou ventilation forcée, est réintroduit dans la pièce au niveau de la bouche du haut. En raison de la température élevée atteinte par l'air sur cette dernière, nous avons installé une gaine souple en aluminium de Ø 152 mm, en doublage intérieur d'un tube carré confectionné en contreplaqué CTBX (qualité extérieur). Il sera lui-même scellé dans la maçonnerie et isolé par la même occasion, au moyen d'une bombe de mousse auto-expansive de polyuréthane.

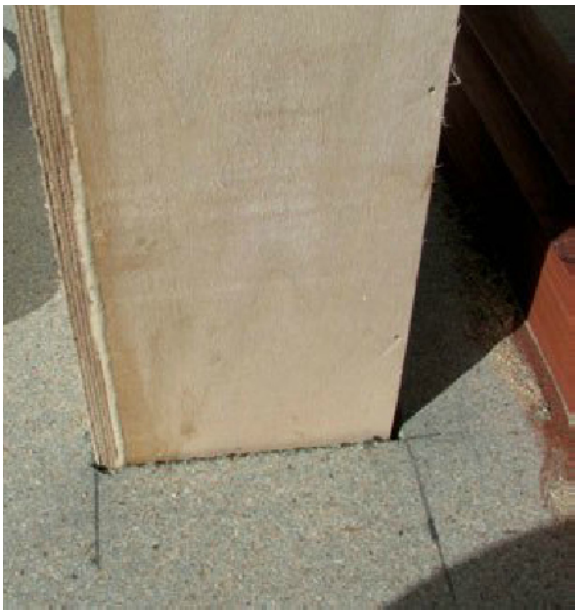


Principe du
fonctionnement

Confection des tubes en contreplaqué CTBX de 10 mm

Conduit inférieur rectangulaire

Tracé et découpe à la scie sauteuse des ouvertures à travers le fond et l'isolant



Vérification de la découpe

À l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, on pourra amorcer proprement les ouvertures dans la façade, puis conclure avec des moyens mécaniques adaptés : marteau + burin ou perforateur pneumatique. L'insertion des conduits en contreplaqué doit être aisée, et parfaitement perpendiculaire au plan vertical du mur extérieur. La cloison intérieure en briques ou plaque de plâtre après la couche d'isolation sera traversée avec précautions. Les conduits seront en principe plus longs que l'épaisseur à franchir, leur ajustement se fera lorsque le corps du capteur sera plaqué le long du mur. Par contre, on veillera à ne pas faire dépasser les conduits à l'intérieur, au moyen d'un tasseau de contrôle placé en travers. Après fixation correcte, un garnissage s'impose, au plâtre à l'intérieur, au ciment à l'extérieur.

Ouverture du mur extérieur

Un point sur la protection

N'oubliez pas de vous protéger les yeux avec des lunettes adaptées lors de l'utilisation des outils tels que la tronçonneuse ou le perforateur.

Mise en place du conduit supérieur, fixation à la bombe de mousse auto-expansive

Garnissage extérieur

Mise en place et aménagements intérieurs

Nous allons pouvoir plaquer le cadre contre la façade, reposant sur la cornière du bas, à travers les 2 conduits dépassant du mur. Il faudra sans doute procéder à deux personnes pour mener à bien cette installation délicate, compte tenu du poids de l'ensemble. Une verticalité parfaite est requise, simplement pour une raison esthétique. Le capteur sera fixé à travers la cornière basse au moyen de 3 tirefonds ou vis à tête creuse, de même en haut à travers les 2 équerres. Un avant trou avec une petite mèche est conseillé pour éviter de fendre le bois du capteur. Les conduits sont ajustés en ôtant à la scie la longueur excédentaire. Une teinture plus sombre sera appliquée sur tous les côtés intérieurs et visibles du capteur.

Pose du capteur
et mise à niveau

Fixation haute,
découpe des
conduits en CTBX

Traitement noir sur
l'intérieur du capteur

Pour fixer la gaine souple sur le capteur, nous ferons usage d'une plaque carrée en zinc ou en aluminium, destinée à recevoir le conduit extensible, après clouage sur le fond en agglo. Une bande d'aluminium adhésive viendra renforcer cette liaison. Précisément, tout le fond du capteur sera revêtu de cette fine pellicule réfléchissante, destinée à « renvoyer » la chaleur infrarouge produite à l'arrière de l'absorbeur en ardoises. Ce produit très facile à appliquer sera simplement collé en bandes verticales juxtaposées et plaqué à l'aide d'une roulette de peintre en porcelaine.

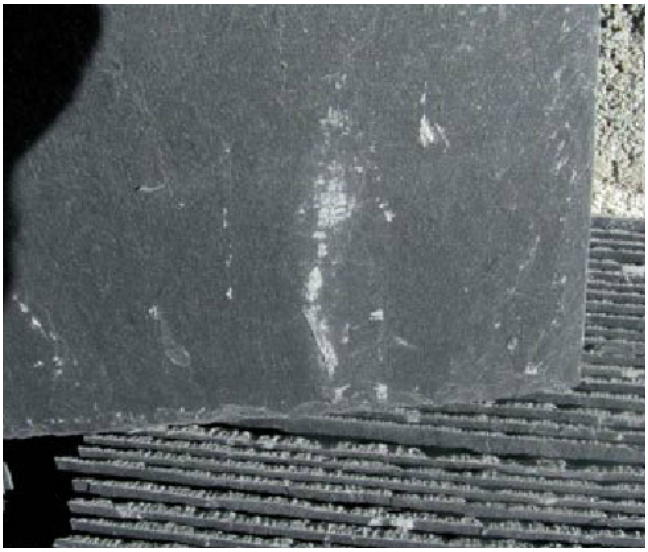
Raccordement gaine aluminium souple Ø 152mm

Pose du revêtement aluminium adhésif

Grille basse en PVC, avec grillage anti-moustique

Chicanes et ardoises

Le fond du capteur une fois revêtu du film d'aluminium sera équipé d'un réseau d'obstacles ou chicanes, en bois brut de 8 x 27 mm. Ils seront disposés en double épaisseur de manière à freiner la thermo-circulation de l'air d'une part, et d'autre part serviront à fixer les ardoises en couches successives partant du bas. La pose traditionnelle du couvreur ne s'impose pas ici, et la quasi-totalité de la surface d'une ardoise (220 x 330 mm) sera exploitée. L'écartement des tasseaux est fonction de la taille des ardoises approvisionnées. Le débit des ardoises sera plus aisé et plus précis si vous pouvez disposer d'une machine électrique à disque diamanté, avec lubrification à l'eau.



La belle ardoise noire d'Anjou, épaisseur 3 mm

Coupe de l'ardoise, perçage, fraisage

Réalisation des chicanes en bois brut

Alignement et pose des ardoises

Dernière rangée avec entretoise en cuivre

Belle uniformité de l'absorbeur noir spécial Anjou ; à noter les vis noires pour les dernières fixations visibles.

Vitrage du capteur

En période estivale, lorsque l'insolation est excessive malgré la hauteur du soleil et les ombrages prévus, il sera prudent « d'ouvrir » le haut du capteur, par l'intermédiaire d'un clapet prévu à cet effet (se prémunir toutefois de la pluie).
En période de chauffage, il sera serré au moyen de deux boulons avec écrous papillons et rondelles, faciles à manipuler. L'étanchéité sera assurée par un joint adhésif en EPDM, le même qui sera utilisé sur le vitrage d'ailleurs.
Il ne restera plus qu'à préparer 3 pare-closes en pin Douglas, qui maintiendront le vitrage en verre trempé de 5 mm d'épaisseur dans la feuillure, préalablement garnie de ce joint marron. Bien entendu une bande de joint régulière de même nature sera disposée sous le bois de la pare-close ou directement sur le vitrage, avant serrage avec des vis à tête creuse de 6 mm. La partie basse du capteur doit rester libre pour permettre à l'eau de pluie de s'écouler sans obstacle.

Clapet de ventilation et joint EPDM

Clapet estival

Premier essai plein soleil,
sans vitrage pourtant

Ainsi se termine la construction de notre capteur solaire thermique à air. Il restera à le doter de quelques perfectionnements électroniques, facultatifs, pour un fonctionnement automatique, fiable et économique, pendant de très longues années, et quasiment sans entretien ni précautions particulières liées au gel. Une intégration totale peut être envisagée, mais cela exigera des travaux plus lourds sur la façade, à moins de le prévoir lors de la construction.

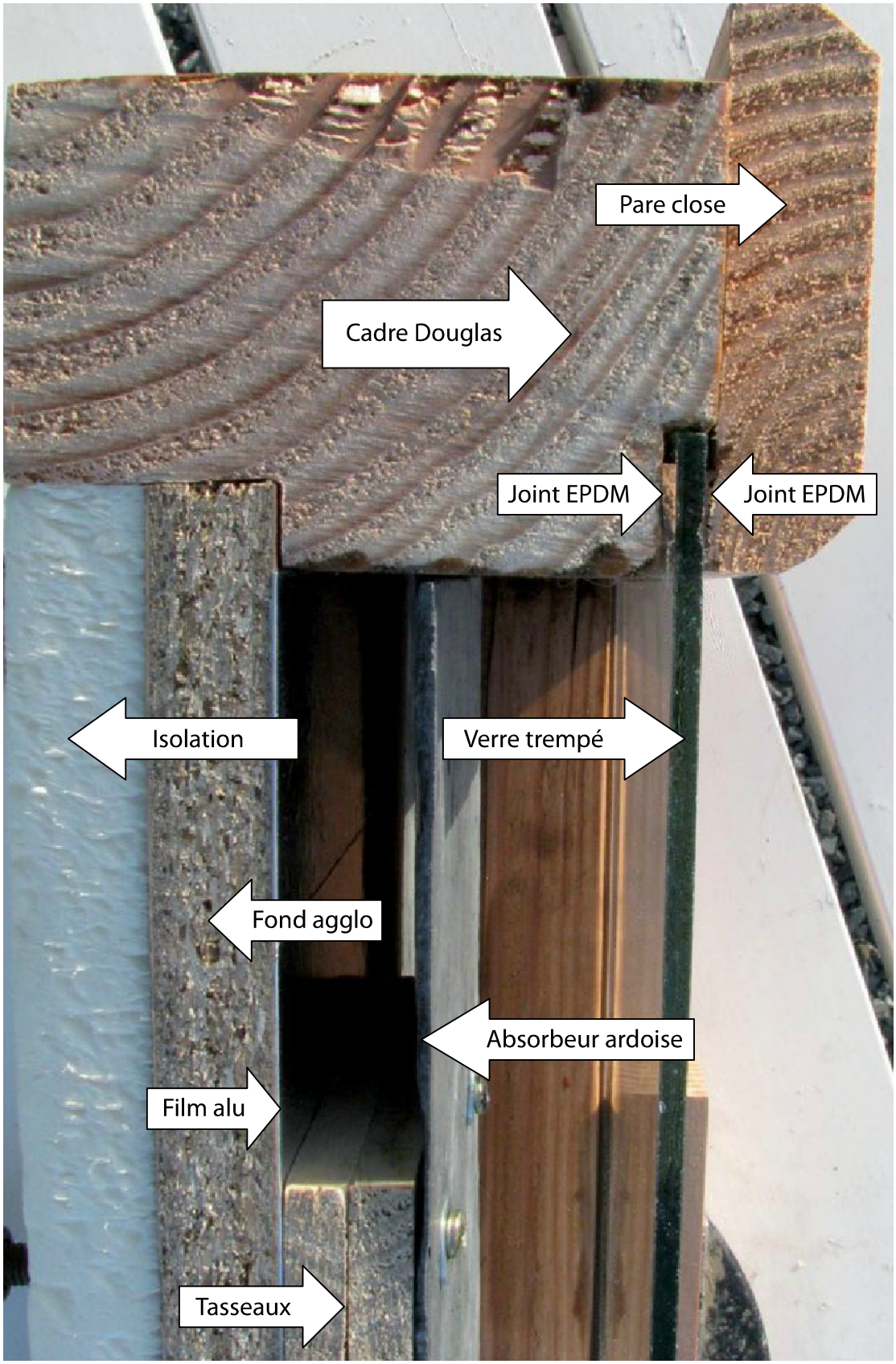
Réalisation et pose
pare-closes

Mise en place du vitrage, détail du bas

Le capteur solaire à air achevé et opérationnel… en hiver

Le point de vue de l'auteur…

Le modèle en coupe de ce capteur me sert souvent de support pédagogique pour satisfaire la curiosité des nombreux visiteurs ou amateurs, dubitatifs ou intéressés devant notre façade sud équipée de 7 capteurs de ce type. L'occasion de promouvoir une autre facette du solaire trop méconnue en France me semble-t-il !


Pare close
Cadre Douglas
Joint EPDM
Joint EPDM
Isolation
Verre trempé
Fond agglo
Absorbeur ardoise
Film alu
Tasseaux

La gestion estivale

Se protéger du soleil

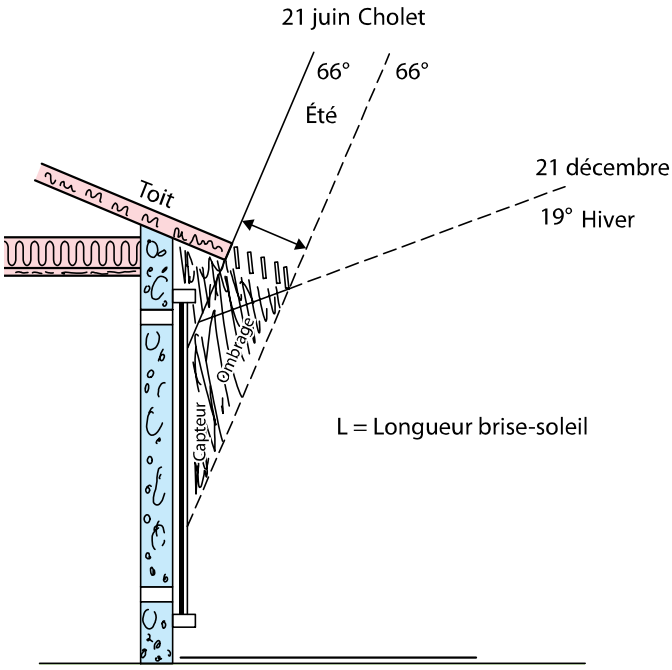
L'implantation verticale de notre capteur à air privilégie bien entendu une exploitation maximale des apports solaires en hiver, avec une exposition idéale au sud. Compte tenu que 90 % de l'énergie captée le sera à cette saison entre 9 h et 15 h, on veillera à ne pas être gêné par tous les masques de l'environnement (reliefs, bâtiments, haies, arbustes, obstacles divers) pour bénéficier au plus tôt du soleil le matin et le plus tard possible encore dans l'après-midi.

Cependant, il n'en va pas du tout de même en été, lorsque l'apport calorifique solaire plus important devient inutile et même quasiment indésirable, au risque de surchauffe dans les habitations. Le soleil réalise un parcours différent, plus long et plus haut, et il nous faudra au contraire éviter le plus possible d'exposer le capteur au rayonnement solaire, ou du moins parvenir à en réduire les effets. C'est tout le contraire donc d'un chauffe-eau solaire (CESI) chargé de produire en toutes saisons de l'eau chaude, et dont l'orientation sera un compromis été/hiver. Les panneaux photovoltaïques également seront exposés pour produire de l'énergie électrique toute l'année. De multiples solutions existent, à commencer par un débord de toiture au-dessus du capteur, soit par construction (auvent ou terrasse), soit par une « casquette », occasionnant un ombrage suffisant à la bonne période. Cette solution dite passive doit être correctement dimensionnée pour un fonctionnement automatique, compatible avec la latitude du lieu d'implantation et la période de chauffe désirée.

On pourra s'inspirer des indications de la figure ci-contre pour élaborer une « casquette » adaptée à vos spécifications.

Il a été conçu en principe pour ombrager une ouverture dans la façade, mais il vous sera facile de l'adapter à la protection d'un capteur aérothermique vertical, installé sur un mur au sud.

À noter encore que dans le cas d'une fenêtre, un brise-soleil à lames orientées selon l'angle du soleil au solstice d'hiver permet de produire un ombrage estival maximal sans



Dimensionnement d'un brise-soleil

Avancée du toit et ombre naturelle chêne rouge d'Amérique, en août

obturer totalement la lumière en hiver, puisque celle-ci pourra facilement passer entre les lames horizontales.

Une autre solution très simple et naturelle consiste à implanter à proximité du capteur des arbres à feuillage caduque, ne créant donc pas trop d'obstacle l'hiver, mais produisant un ombrage intéressant l'été (masque saisonnier).

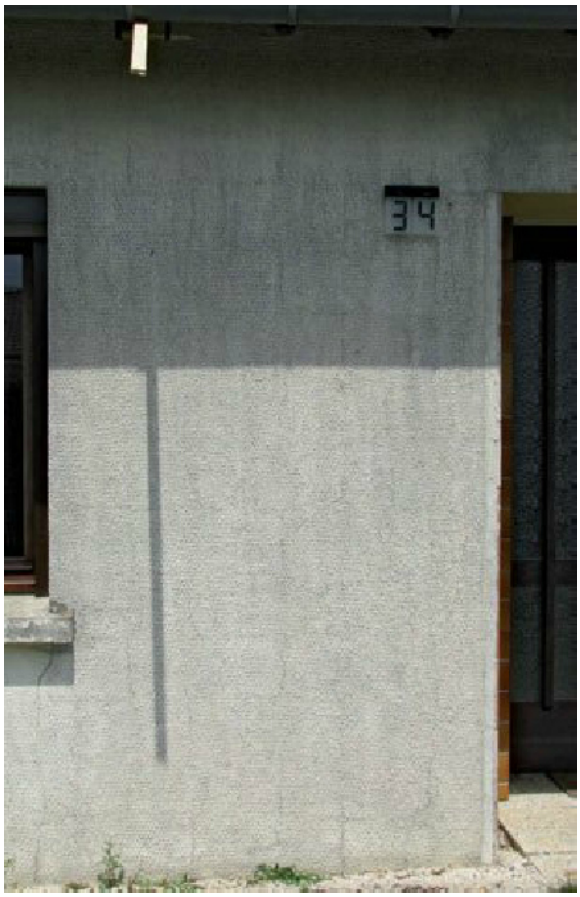
Des structures horizontales en fil de fer tendu, utilisant des plantes grimpantes non persistantes, sont également envisageables pour un coût très réduit. Enfin, des protections mobiles telles des stores ou rideaux extérieurs pourront être disposés contre le vitrage, mais exigeront de résister aux intempéries (pluie, vent) et devront être démontées l'hiver. Nous avons estimé l'ombre produite par un tasseau fixé provisoirement en prolongement des chevrons dépassant du toit, aux alentours du solstice d'été le 21 juin, lorsqu'une ombre maximale est recherchée.

Calculer son avancée de toit

Nous vous signalons un logiciel simple et pratique qu'il vous suffira d'exécuter en ligne pour calculer précisément la taille de l'avancée de toit recouvrant votre capteur : http://p.rozet.free/Pages_fr/calcul-avancee-toit).

Aller plus loin

Bien entendu, la courbe présentée à la page 24 (chapitre « Le soleil et la Terre ») vous dévoilera également l'angle ou hauteur solaire en toutes saisons, sachant que seul pour les mois les plus chauds le capteur sera occulté.



Évaluation de l'ombre portée le 25 juin en façade sud

Pour mesurer l'angle solaire au zénith, il est facile de monter un petit dispositif sur la façade ; à l'aide d'un simple tronçon de tube PVC de 40 mm de diamètre, orienté à la bonne date lorsque le soleil est au plus haut. On cherchera à obtenir une ombre bien circulaire. À noter que le tasseau de fixation doit être bien vertical !

Mesure de l'angle solaire au zénith

Aller plus loin

Nous vous proposons, dans les pages suivantes, de construire une protection solaire fixe ou brise-soleil horizontal, au moyen de quelques lames de PVC blanc.

Si toutefois vous ne souhaitez ou ne pouvez pas mettre en place un ombrage estival, il vous restera toujours la possibilité d'ouvrir totalement le clapet supérieur prévu dans le cadre. On mettra ainsi le volume intérieur à l'air libre écartant tout risque de surchauffe. Un grillage fin intérieur évitera bon nombre d'introductions intempestives, à la condition de protéger l'ouverture supérieure de la pluie. Il sera bon de fermer également le clapet intérieur de la pièce affectée au capteur, toujours pour éviter d'introduire des degrés supplémentaires inutiles l'été.

Construire une protection solaire

Pour mener à bien cette réalisation, il convient d'utiliser un matériau économique, facile à travailler, inaltérable à l'extérieur, solide, et si possible léger. L'exploitation de quelques plinthes blanches en PVC nous a semblé une solution acceptable. Les profilés proposés, disponibles en grande surface de bricolage (GSB) par longueur de 2,6 m sont constituées de 2 parties emboitables, pour pouvoir éventuellement à l'origine y insérer des liaisons

filaires électriques, téléphoniques ou informatiques. Il nous suffira de solidariser les 2 pièces à l'aide d'une colle spécialement prévue pour les plastiques durs.

La plinthe en PVC blanc

Les montants renforcés

Les deux montants latéraux, du même profil que les lames seront toutefois renforcés par l'adjonction d'un tasseau de sapin, qui facilitera la pose de vis ultérieurement, aussi bien pour la fixation des équerres sur le bois de charpente que les logements des lames.
À l'aide d'un petit profil PVC en U (disponible dans le même rayon que la plinthe) on pourra facilement obturer les sections ouvertes des profils, simplement par collage, avant finition à la lime et au papier de verre.

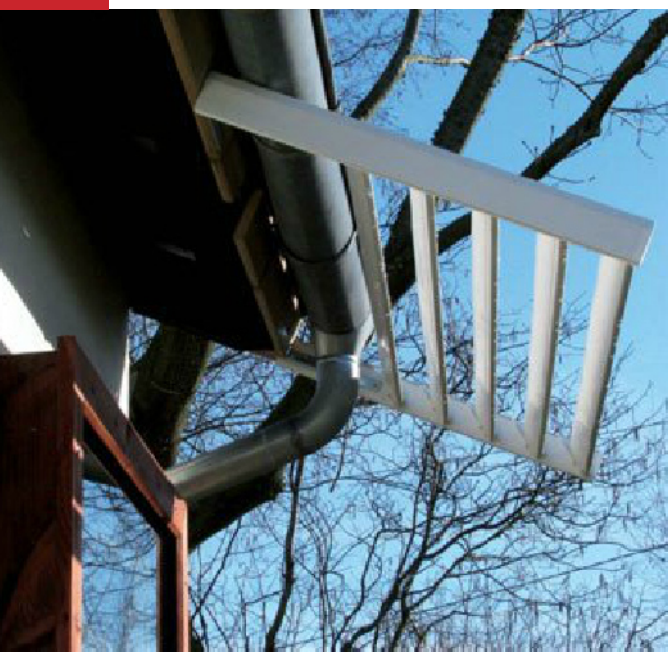
Préparation des lames

Des glissières, toujours en PVC blanc, seront taillées en oblique et fixées par collage, puis vissage selon un angle et un écartement à déterminer. Il n'y a pas ici d'obligation de laisser passer les rayons solaires entre les lames en hiver, il suffit qu'ils puissent atteindre le capteur en passant **sous** le brise-soleil (pas d'ombrage en période de chauffe !).

Les glissières de fixation des lames

Les montants sont fixés au moyen de solides équerres métalliques, pour prolonger en quelque sorte la toiture au-dessus du capteur. On veillera à obtenir un ombrage au plus fort de l'ensoleillement seulement, lorsque le capteur n'est plus utile en appoint de chauffage : de la fin du printemps au début de l'automne environ, selon les régions. On pourra moduler l'efficacité du brise-soleil en jouant sur le nombre de lames en service, mais seulement s'il est aisé d'y accéder.

Mise en place des lames, fixées par une vis



Le brise-soleil opérationnel en mi-saison

Complément : l'albédo

L'installation et le rendement d'un équipement utilisant l'énergie solaire, comme c'est le cas pour notre capteur à air, est tributaire également de la luminance du sol ; en effet, selon la nature du matériau de revêtement placé **sous** le capteur, une partie plus ou moins importante du rayonnement solaire sera renvoyée vers l'absorbeur par réflexion ou réverbération.

Surface d'eau	2 à 4 %
Asphalte sec	5 %
Sol sombre	5 à 15 %
Cultures	15 à 25 %
Pelouse verte	25 %
Sable léger et sec	25 à 45 %
Béton	55 %
Neige tassée	40 à 70 %
Neige fraiche	75 à 90 %

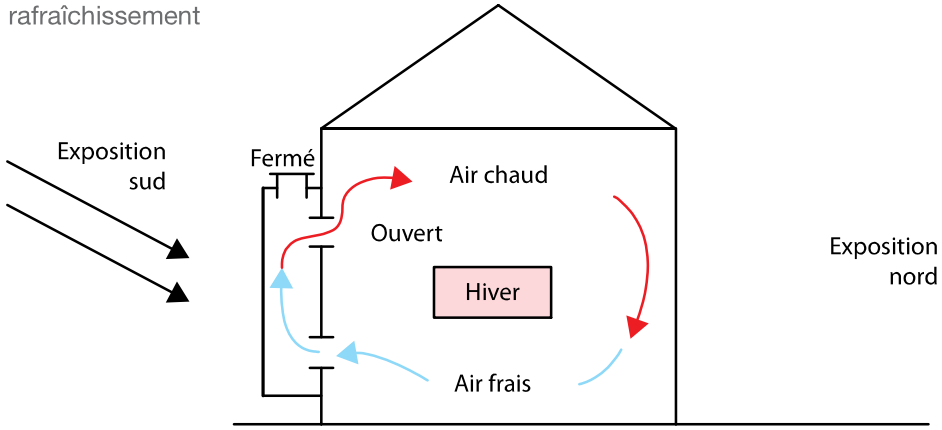
On appelle justement **albédo** (du mot latin signifiant blancheur) la fraction de radiation solaire incidente qui est réfléchie par une surface quelconque. Il s'agit là d'un indicateur climatique important, directement lié à la température sur notre planète. Ainsi l'absorbeur noir en ardoise a un albédo très inférieur à celui des lames blanches en PVC de l'auvent construit précédemment. Sa valeur sera exprimée de 0 à 1, ou mieux de 0 à 100 % sans unité. L'albédo moyen de la terre est donné à 30 % généralement.

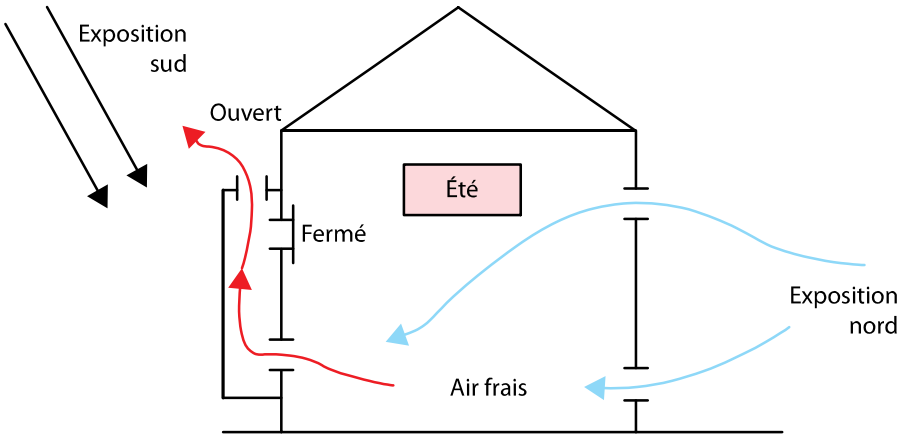
Vous trouverez dans le tableau suivant quelques valeurs utiles pour optimiser le rendement de votre capteur à air… en hiver, où un épisode neigeux atteindra sur le sol des valeurs impressionnantes de réverbération, sans aucun risque d'accumulation d'une couche de neige sur le vitrage, contrairement aux autres applications solaires thermiques ou photovoltaïques.

Rafraîchissement estival

Pendant la saison chaude, nous venons de voir qu'il est possible de mettre à l'ombre en quelque sorte le capteur, pour lui éviter une surchauffe inutile et désagréable. Et pourquoi ne pas exploiter cet excès de chaleur pour tenter de provoquer un courant d'air bénéfique, apte à entraîner l'air chaud de la pièce, en profitant de la convection naturelle créée dans le capteur lui-même ? Il suffira de disposer d'un apport d'air frais provenant d'une exposition au nord, ou du moins de pièces de la maison non soumises à un soleil direct. On fermera bien entendu la trappe haute intérieure en service l'hiver, tout en ouvrant celle du capteur prévue dans le haut du cadre. Un courant d'air se formera qui traversera le local pour le rafraîchir. On trouvera le principe de ce dispositif très simple sur la figure ci-dessous.
Un petit ventilateur, déjà prévu dans le conduit du bas du capteur, ne pourra qu'améliorer l'efficacité du dispositif, en veillant à n'utiliser que des moteurs très silencieux. À expérimenter donc, sachant que cet artifice ne remplacera jamais une climatisation traditionnelle, plus gourmande aussi, il est vrai, en consommation électrique.

Principe du rafraîchissement solaire





Les options électroniques

Dans ce dernier chapitre, nous vous présentons quelques modules électroniques utiles à l'exploitation de notre capteur solaire aérothermique, mais non indispensables à son fonctionnement. Il s'agit notamment de gérer la vitesse du petit ventilateur en partie basse, pour introduire l'air frais prélevé au niveau du sol dans la pièce à chauffer, et surtout de l'automatisation totale de la trappe d'air chaud en partie haute, en fonction de la température de l'air **dans** le capteur. On évitera ainsi les déperditions nocturnes par inversion du flux d'air, en raison du phénomène de convection naturelle. Nous n'avons pas jugé rentable de construire un thermomètre électronique, capable de mesurer avec précision des valeurs de températures qui pourront atteindre les 100 °C, compte tenu des modèles très économiques et fiables disponibles sur le marché. Le modèle VM145 de Velleman, avec affichage des valeurs Min/Max nous a vraiment séduits. Sa plage de mesure de -30 °C à +120 °C sera particulièrement appréciée. Il est distribué notamment par Lextronic qui assure bon nombre de l'approvisionnement des composants utilisés dans cette section.

Thermomètre Velleman

Une alimentation 12 volts photovoltaïque pourra rendre totalement autonome notre capteur solaire, moyennant un ensemble comprenant panneau PV, régulateur et batterie adaptée. Bien entendu cet équipement devra être approvisionné, et surtout dimensionné en fonction des puissances nécessaires. Nous en dirons quelques mots en fin de chapitre.

Solarimètre numérique

Nous savons déjà que la « puissance solaire » disponible ou irradiance, exprimée en W/m^2, est variable dans de grandes proportions avec les saisons, l'orientation du capteur, les conditions météorologiques, les ombrages occasionnels ou obstacles rencontrés. Notre mesureur appelé solarimètre, fera appel à un détecteur de lumière (ou photodiode) un peu particulier, et très bien adapté à cette réalisation.

Principe du montage

L'ensemble du rayonnement électromagnétique du corps chaud que représente le soleil forme un spectre très vaste, des rayons cosmiques aux ondes hertziennes, en passant par les UV, les IR et la lumière visible. Ces deux derniers rayonnements sont les vecteurs essentiels de l'énergie solaire thermique exploitable sur terre. On sait également que la lumière solaire qui nous parvient peut être directe, diffuse et même réfléchie. L'angle d'incidence des rayons est primordial, car plus le flux est oblique ou rasant, plus il sera faible.

Notre capteur sera donc une photodiode sensible, qui génère un courant proportionnel à l'éclairement reçu. Il s'agit d'un composant qui porte la référence BPW 21.

Sa réponse spectrale entre 350 nm et 820 nm est en fait très proche de la sensibilité de l'œil humain, avec une valeur maximale se situant autour de 550 nm qui correspond à une couleur verte. Sans entrer dans le détail de tous les calculs, basés sur une note du CNES, sachez encore que la surface sensible de notre capteur de lumière n'est que de 7,34 mm² avec une puissance maximale captée de 3 mW environ. Pour cette puissance, selon les renseignements de la documentation technique, nous pouvons en déduire que le capteur produira 0,36 mA.

Capteur BPW 21

Il est temps à présent de prendre connaissance du schéma électronique donné sur la figure ci-dessous.

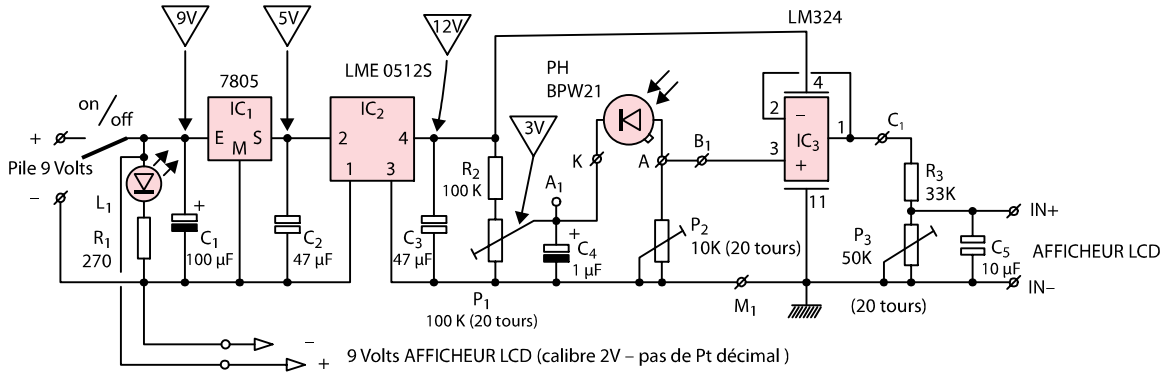
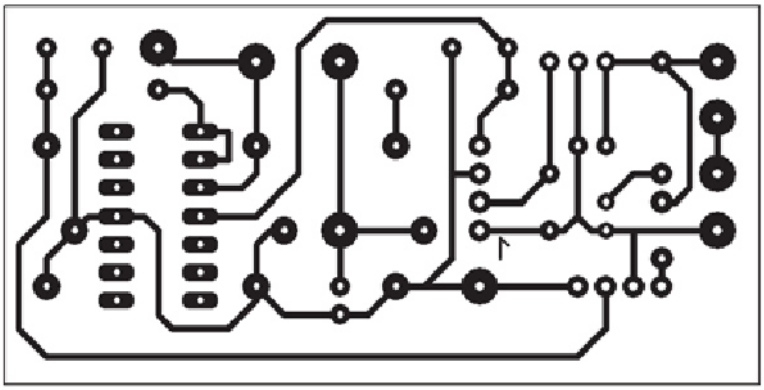


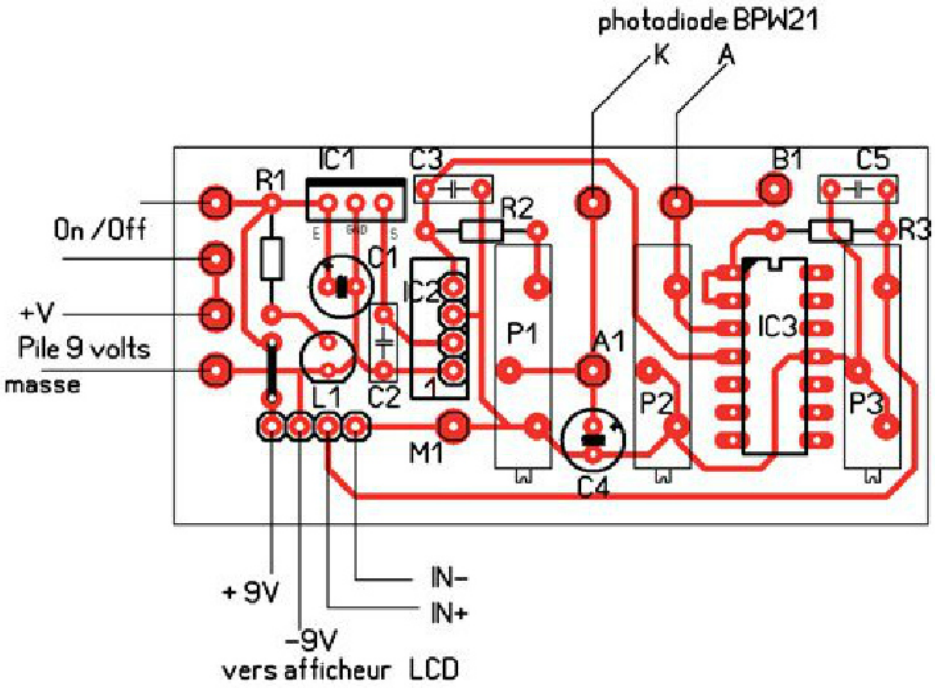
Schéma électronique solarimètre

En raison de la mise en œuvre pour la visualisation, d'un module voltmètre LCD fort compact, mais exigeant une alimentation séparée de 9 volts, il nous a fallu opter pour un convertisseur de tension DC/DC noté IC2. La pile unique de 9 volts produira également une tension stabilisée de 5 volts, grâce au régulateur intégré IC1, aidé des condensateurs de filtrage C1 et C2. Le convertisseur IC2, un modèle LME 05 12S convertit cette tension de 5 volts en une autre de 12 volts, avec séparation galvanique des masses. Nous choisissons d'alimenter notre capteur BPW21 sous une tension de 3 volts, obtenue à l'aide du

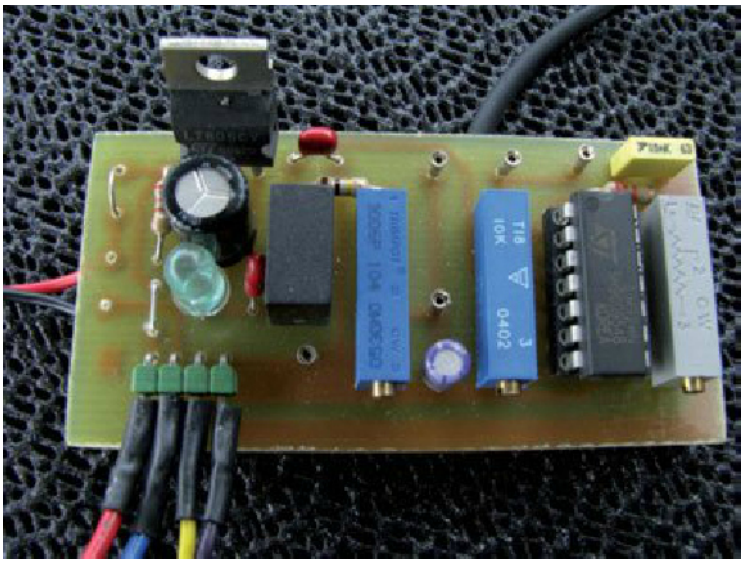
pont diviseur formé par la résistance R2 et l'ajustable P1, un modèle multi-tours de précision. La tension de 3 volts sera prélevée sur le curseur de ce dernier composant pour alimenter le capteur sur sa cathode notée K.
Une simple application de la loi d'Ohm nous permettra de définir la valeur de la résistance à insérer dans le montage de base :
$R = U / I = 3 / 0{,}36.\ 10^{-3} = 8{,}33\ k\Omega$
C'est l'ajustable multi-tours P2 qui sera réglé sur cette valeur précise (entre B1 et M1). Afin de ne pas perturber le fonctionnement de la photodiode par la mise en parallèle de l'étage de sortie, nous avons inséré un montage AOP en suiveur de tension (IC3) qui n'apporte aucun gain mais travaille simplement ici en adaptateur d'impédance.



Cuivre solarimètre (66 x 33 mm)

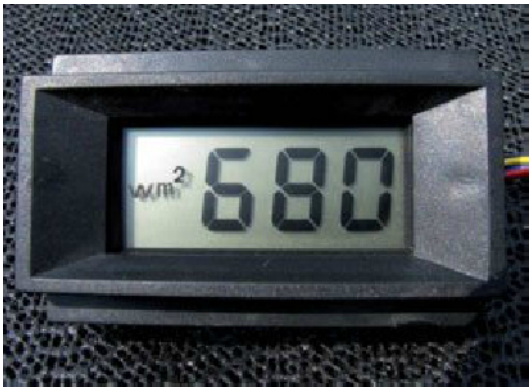


Composants solarimètre



Carte solarimètre

Le module voltmètre LCD sera configuré sur le calibre 2 volts (affichage = 2000 points). Aucun point décimal ne sera donc nécessaire pour une lecture directe, puisque les millivolts affichés seront directement assimilés à notre irradiance en W/m². Un dernier pont diviseur est prévu, puisque pour une tension maximale de 3 volts il nous faudrait afficher 1370 W/m² ou 1370 mV. Les composants R3 et P3 réalisent cette réduction. On pourra utiliser directement l'afficheur LCD pour régler P3, avec un rapport de 1370/2000 = 0,46.



Écran solarimètre

Cet appareil de mesure sera surtout utilisé pour optimiser l'orientation d'un panneau solaire ou d'un capteur thermique, ou encore pour apprécier les effets produits par une vitre, un double vitrage ou d'autres matières plus ou moins translucides. Il n'aura pas la précision d'un appareil de laboratoire, mais pourra délivrer une bonne indication de la puissance solaire exploitable.

Quelques indications...

... pour les opérations de réglage du module afficheur :

- alimenter le voltmètre sous une tension de 9 volts ;
- supprimer tout cavalier ou soudure pour un quelconque point décimal ;
- configurer le calibre 2 volts avec les résistances RA et RB adéquates, à l'arrière du module. RA = 1MΩ +110 kΩ, RB = 10 MΩ ;
- mesurer la tension précise d'une pile de 1,5 volt, et appliquer cette tension entre les bornes IN+ et IN-, avec respect des polarités. Réglage au dos du module pour retrouver cette valeur sur le pavé LCD.

Liste des composants du solarimètre

Semi-conducteurs :

IC1 = régulateur intégré 5 volts positif 7805, boitier TO 220
IC2 = convertisseur DC/DC + 5 V en +12 V à masses séparées. LME 0512S
PH = photodiode BPW21
L1 = diode électroluminescente verte, Ø 5mm
IC3 = quadruple AOP LM 324, boitier DIL 14
Module voltmètre LCD 2000 points, PM 128 BL ou autre

Résistances : (toutes valeurs 1/4 de watt)

R1 = 270Ω
R2= 100 KΩ
R3 = 33 KΩ

Ajustables multi-tours :

P1 = 100 KΩ
P2 = 10KΩ
P3 = 50 KΩ

Condensateurs :

C1 = chimique vertical 100 µF /25 volts
C2 = C3 = non polarisé 47 nF
C4 = chimique vertical 1 µF/ 25 volts
C5 = plastique 10 nF

Divers :

Support à souder DIL 14, picots tulipe
Picots à souder
Fils souples
Gaine thermo

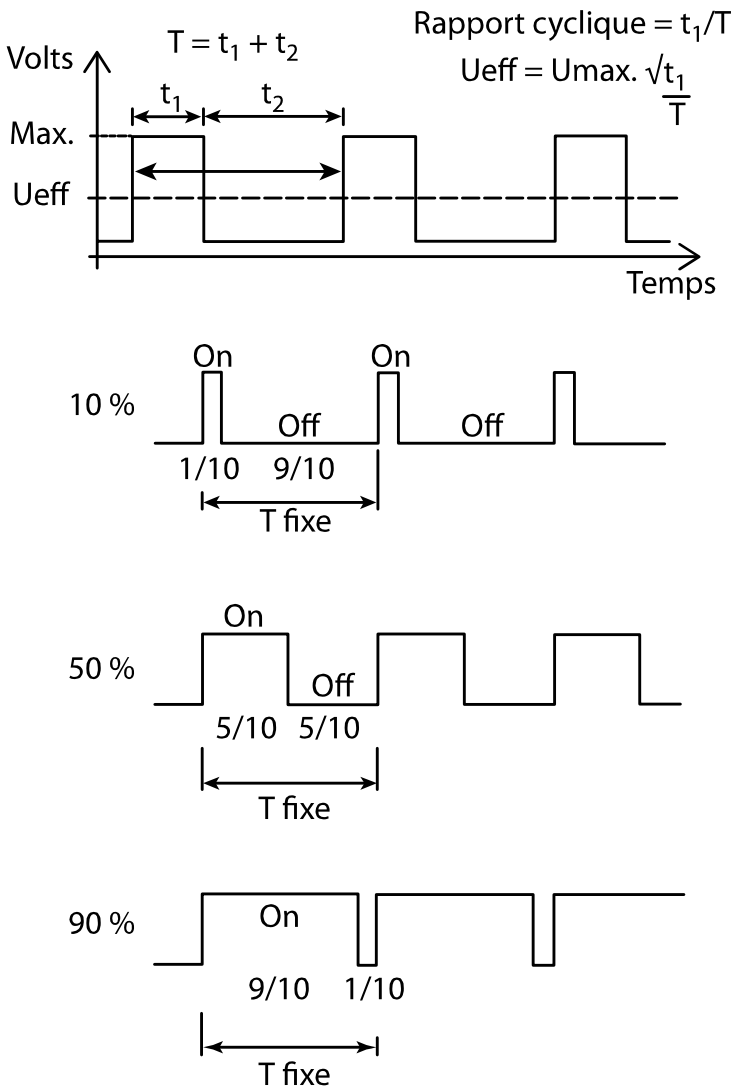
Régulation de vitesse PWM

Le fonctionnement du capteur solaire est basé sur un apport d'air en partie basse, et il est évident que l'utilisation d'un ventilateur, même de faible puissance, ne pourra qu'améliorer notablement la convection le long de l'absorbeur en ardoises. En outre, lorsque la température atteinte dans le capteur sera très élevée, on pourra augmenter la vitesse de l'air pour abaisser les degrés solaires et améliorer le rendement de l'ensemble aérothermique. Nous avons pu constater en effet que l'efficacité est accrue lorsque le débit d'air est plus important grâce à une vitesse plus élevée.
Nous utiliserons des ventilateurs de faible puissance alimentés sous une tension continue de 12 volts. Dans ce type de moteur à aimant permanent, la vitesse est bel et bien proportionnelle à la valeur de la tension d'alimentation :
On a la relation E = k nN Ø

Avec E en volts, k = facteur constant dépendant du type de machine, n = vitesse de rotation, N = nombre de brins actifs dans le bobinage, Ø = induction magnétique fixe par aimant permanent.
Pour faire varier la vitesse, il n'est pas question de faire appel à un rhéostat, sorte de résistance variable en série avec l'un des fils de l'alimentation. L'effet Joule ou échauffement se manifesterait très vite, avec un gaspillage important d'énergie, surtout si celle-ci doit provenir d'une source photovoltaïque.

Principe du montage

Une autre solution plus élégante sera mise à contribution : en considérant l'allure d'un signal carré non symétrique, on peut constater que la période T est constituée par un état haut t1 suivi d'un état bas t2.
On a bien entendu T = t1 + t2
Et la fréquence moyenne f du signal vaudra f = 1/T = 1/(t1 + t2).
On appelle justement rapport cyclique le rapport t1/T, exprimé en pourcentage.
En supposant t1 égal à t2, les états haut et bas valent respectivement 50 % de la période T : on dit alors que le rapport cyclique est de 50 %.Dans ce cas précis, la tension moyenne appliquée sur le moteur sera égale à la moitié de la tension d'alimentation. Il est donc facile de comprendre que la simple modification de t1 entraîne celle de t2, et par voie de conséquence le rapport cyclique et la valeur de la tension moyenne résultante. Le « hachage » d'une tension continue produit bien une tension variable, dont la valeur peut évoluer entre 0 volt et le maxi de l'alimentation.



Principe PWM ou MLI

U moyen = U maxi. t1 / (t1 + t2)
La vitesse nulle du ventilateur n'est pas souhaitable, mais sur une large plage de la tension d'alimentation nous pourrons facilement modifier la vitesse du ventilateur.

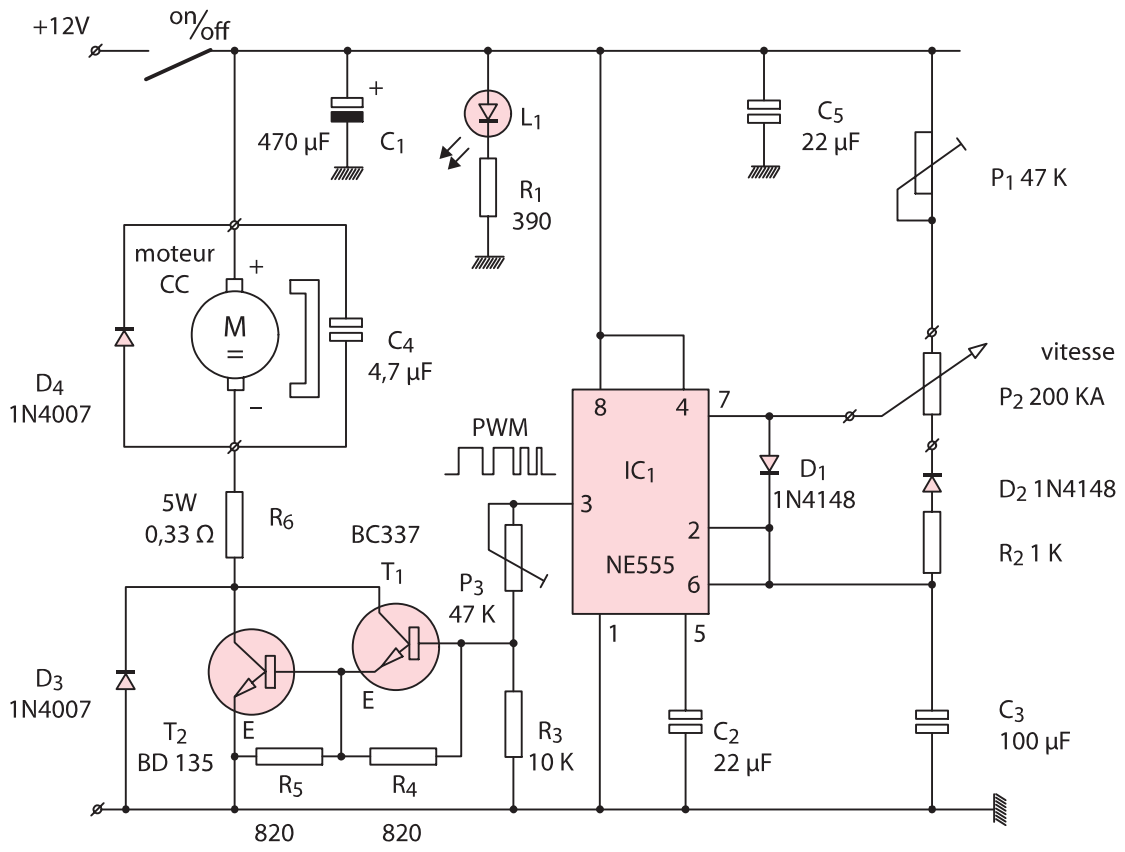
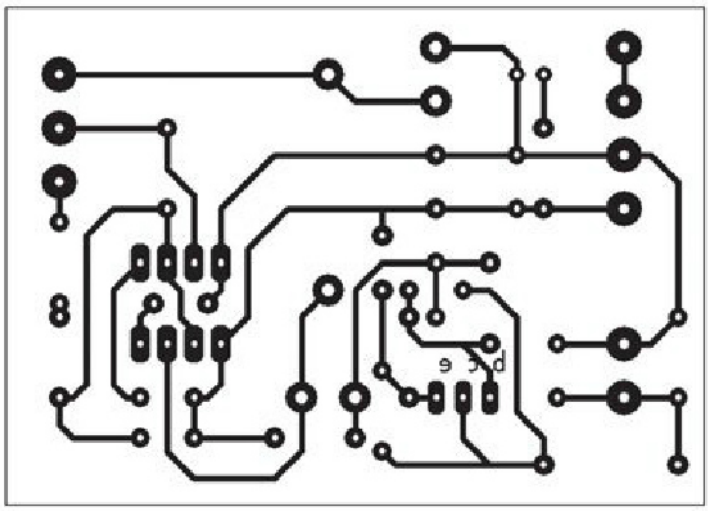


Schéma ventilateur PWM

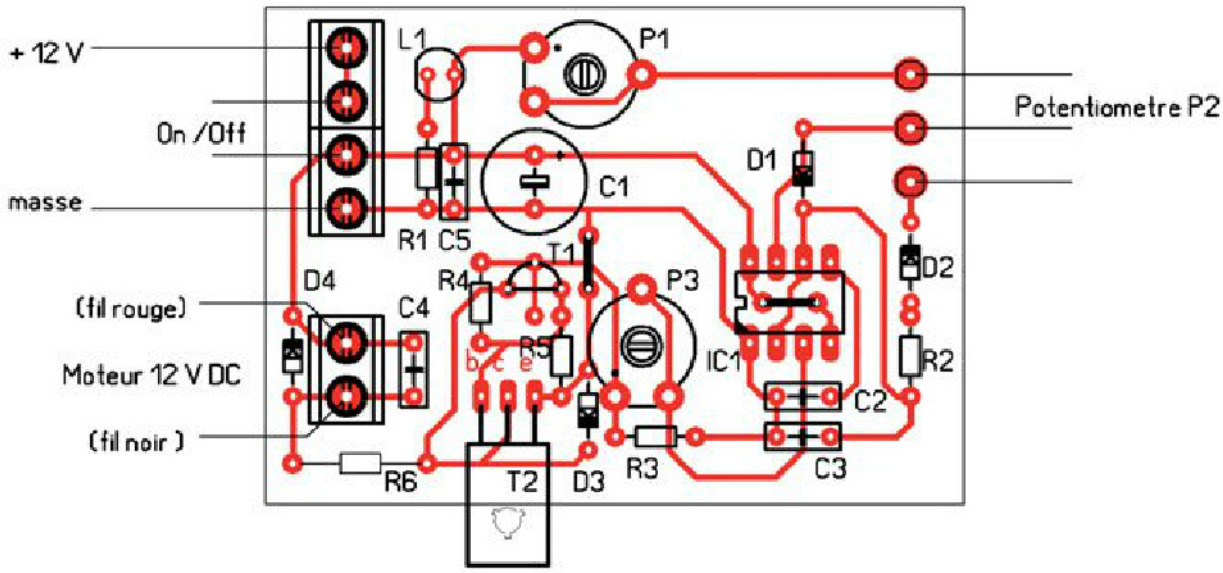
Analyse du schéma électronique

Le cœur du dispositif repose sur un oscillateur astable construit autour du célèbre circuit intégré NE 555, notre circuit IC1. La fréquence du signal carré produit dépend du condensateur C3 et des composants P1, P2 et R2. La présence des diodes D1 et D2 permet d'obtenir des durées de charge et décharge inégales de la capacité C3. La fréquence sera définie une fois pour toutes par l'ajustable P1, tandis que le rapport cyclique (donc la vitesse) sera modifié par la position du potentiomètre P2.

Le signal de sortie est du type MLI (modulation par largeur d'impulsion) ou PWM en anglais. Il est disponible sur la broche 3 du circuit NE 555. Les composants P3 et R3 forment un pont diviseur réglable, chargé de commander l'étage de puissance Darlington, constitué par les transistors NPN T1 et T2, dont les gains se multiplient. On pourrait d'ailleurs fort bien remplacer ces deux composants par un transistor de puissance unique, du genre TIP 141 par exemple. Le collecteur commun alimente le moteur DC à travers une résistance de puissance, mais de faible valeur ohmique. La diode D3 protège l'étage à transistors des surtensions selfiques éventuelles, tandis que la diode D4 dite DRL (diode de roue libre) assure la continuité du courant dans la charge pendant la durée (T – t1) sans alimentation. Bien entendu, on veillera à obtenir le sens de rotation correct pour un flux d'air dirigé vers le capteur. Quelques moteurs sont parfois dotés d'une diode de protection interne, empêchant toute rotation si les polarités sont inversées.



Cuivre ventilateur (63 x 45 mm)



Composants ventilateur

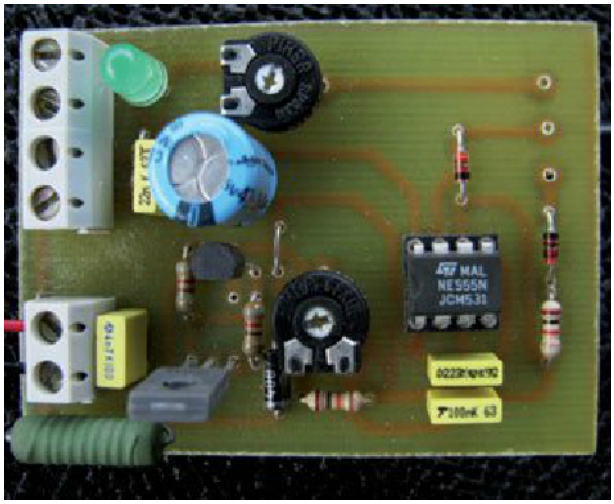
Sur certains ventilateurs, on pourra trouver 3 fils de couleur, le rouge et le noir pour l'alimentation tandis que le fil jaune, non utilisé ici, délivre une information de vitesse, bien utile parfois pour surveiller le refroidissement des PC. Le choix des ventilateurs est très vaste, mais nous avons déniché des modèles très silencieux (10 dB !), livrés avec des tampons antivibratoires, chez Selectronic. Il vous appartient de trouver la bonne taille et la bonne puissance en fonction du débit et des dimensions du conduit d'air. Le réglage du module est fort simple : à l'aide des ajustables P1 et P3, déterminer la plage de réglage mini-maxi, tout en actionnant le curseur de P2. Veiller tout de même à permettre le démarrage du moteur, à vérifier visuellement compte tenu de son silence de fonctionnement.

Ventilateur gamme économique

Ultra-silencieux 10 dB

Amortisseur

Alimentation trois fils



Carte ventilateur

Liste des composants ventilateur

Semi-conducteurs :

IC1 = oscillateur NE 555, boitier DIP 8
D1, D2 = diode commutation 1N 4148
D3, D4 = diode redressement 1 N 4007
L1 = diode électroluminescente verte, Ø 5 mm
T1 = transistor NPN BC 337
T2 = transistor NPN puissance BD 135

Résistances (toutes valeurs ¼ de watt) :

R1 = 390Ω
R2 = 1 KΩ
R3 = 10 KΩ
R4 = R5 = 820 Ω
R6 = résistance de puissance 5 W - 0,33Ω
P1 = ajustable horizontal, pas 2,54 mm, 47 KΩ
P2 = potentiomètre 200 KΩ + bouton, courbe A
P3 = ajustable horizontal, pas 2,54 mm, 47 KΩ

Condensateurs :

C1 = chimique vertical 470 µF / 25volts
C2 = plastique 22 nF
C3 = plastique 100 nF
C4 = plastique 4,7 nF
C5 = plastique 22 nF

Divers :

Support à souder DIP 8, broches tulipes
3 blocs de 2 bornes vissé-soudé, pas de 5 mm
Ventilateur à aimant permanent, 2 ou 3 fils, alimentation 12 V continu
Modèle silencieux XL1 chez Selectronic

Trappe automatisée

La gestion optimale d'un capteur solaire vertical à air impose de pouvoir bloquer le flux d'air de la pièce vers le capteur en cas d'absence de soleil la journée, ou le soir venu jusqu'au lendemain. On souhaite bien entendu conserver la chaleur accumulée dans la pièce, et non refroidir celle-ci lorsque le soleil n'est plus actif directement, ou du moins lorsque l'absorbeur en ardoises n'a plus de calories à céder. Nous estimons à 25 °C environ le seuil de température « capteur » en dessous duquel il faudra fermer la trappe haute dans la pièce. Nous allons donc dans un premier temps réaliser un tel dispositif mécanique, en intégrant le fait que la température pourra atteindre 100 °C même au plus fort de l'hiver !

Pour avoir fermé manuellement pendant de longues années la trappe prévue sur un capteur expérimental, monté il y a plus de 25 ans, et toujours parfaitement opérationnel, nous sommes convaincu qu'une automatisation intégrale est hautement appréciable et facilement réalisable aussi bien du point de vue mécanique qu'au niveau de la gestion électronique.

Réalisation mécanique

Nous nous sommes inspirés du matériel proposé pour la distribution d'air chaud à partir d'un foyer fermé à bois ou insert. La forme circulaire nous semble la plus appropriée, tant pour le raccordement de la gaine flexible en aluminium (Ø 150 mm) que pour le mouvement du clapet rond, qui devra simplement pivoter sur son axe. Le mouvement sera provoqué par un petit motoréducteur à courant continu, placé en dehors du flux de l'air chaud.

Le métal est obligatoire, mais à moins de vouloir travailler du cuivre, du laiton ou du zinc, il est plus économique de faire usage de quelques pièces en tôle galvanisée, matériau qui présente en outre l'avantage de pouvoir bénéficier d'un assemblage par soudure à l'étain. Il suffira pour ce faire de disposer d'un fer à souder électrique taille XXL, donc de très forte puissance (le nôtre fait 300 watts !) et de faire usage d'une pâte décapante disponible en GSB au rayon plomberie. L'étain à utiliser est le même que celui du couvreur qui assemble ses gouttières en zinc, et qui se présente sous forme de baguettes massives et peu onéreuses. Quelques essais sur des chutes de métal nous ont bien vite permis de réussir des soudures solides à défaut d'être à chaque fois esthétiques.

L'ensemble mécanique devra remplir quelques fonctions précises, liées parfois aux composants approvisionnés, ce qui justifie la forme du modèle réalisé et présenté sur la photo ci-contre.

Manchon et clapet circulaire

Opération soudage

Ensemble mécanique

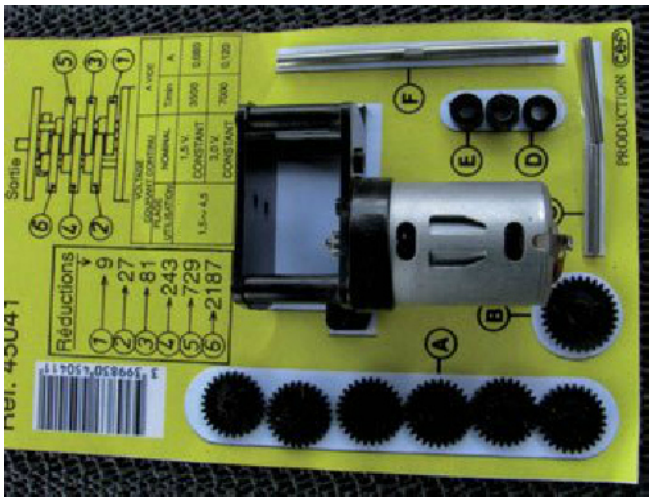
Une couche de peinture noire, en bombe, et résistante à la chaleur, a été déposée sur toutes les faces, après soudures et perçages. Cette peinture est facultative si la trappe est masquée à la vue.

→ raccorder la trappe sur la gaine souple en aluminium, et fixer cette dernière au moyen d'un collier de serrage métallique.
→ prévoir deux pattes de fixation de l'ensemble ainsi raccordé.
→ souder le support latéral gauche du motoréducteur utilisé.
→ prévoir deux pivots diamétralement opposés pour la mise en place de l'axe en laiton de 2 mm.
→ souder des « dominos » en laiton sur l'axe pour l'entraînement du motoréducteur et la fixation du volet mobile.
→ installer le support latéral droit pour positionner les deux fins de course, ainsi qu'une came solidaire de l'axe.
→ positionner une fin tube de cuivre pour permettre la mise en place de la sonde de température dans le flux d'air chaud.

Vue extérieure côté pièce

Vue intérieure, côté capteur

Pour le moteur d'entraînement, de nombreuses possibilités existent, notamment sur le choix de la tension d'alimentation et la vitesse de rotation qui devra être très réduite. Certains produits économiques proposent de monter les engrenages à la demande pour atteindre le taux de réduction souhaité.
Nous avons préféré choisir un motoréducteur compact et puissant, alimenté sous une tension de 12 à 24 volts, avec une vitesse de rotation de l'ordre de 6 tours à la minute. Il s'agit du modèle MFA, RE 280/1 avec ratio 1024-1, distribué par Selectronic.



Moteur économique à configurer

Motoréducteur MFA

Accouplement du motoréducteur

Ensemble fin de course

L'axe en acier de 4 mm du réducteur comporte un petit méplat, bien utile pour se solidariser sur l'axe du volet au moyen d'un manchon improvisé en laiton, avec serrage par vis.

La course du volet se limite à un angle de 90 degrés, ce qui justifie également la position à angle droit des deux interrupteurs de position. Leur mise en place précise est également fonction de la taille de la came solidaire de l'axe, et bien entendu destinée à actionner l'un ou l'autre des capteurs de position. Le seul travail quelque peu délicat consistera à orienter convenablement le volet mobile et à le fixer solidement par les 4 vis des « dominos » prévus à cet effet.

Module de commande électronique

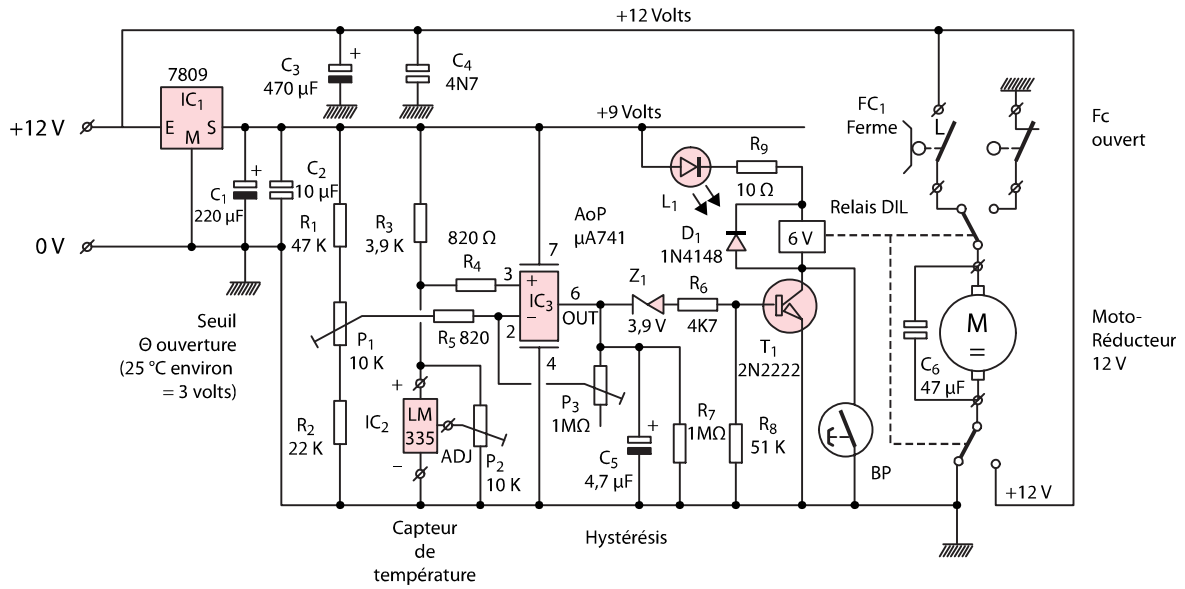
Il s'agit simplement de fermer le volet mobile lorsque la température d'air chaud, mesurée dans la gaine alu du haut, est inférieure à environ 25 °C. Bien entendu, cette valeur sera ajustable après expérimentation. Le schéma électronique est proposé sur la figure ci-contre.

Il sera alimenté comme à chaque fois sous une tension continue de 12 volts. En fait, cette valeur est destinée au moteur de la trappe, qui, bien que fonctionnant brièvement, risquait d'occasionner des perturbations sur le fonctionnement de circuit électronique de mesure et de commande ; ce dernier sera donc alimenté à partir d'une autre tension de 9 volts seulement, à travers le régulateur IC1 et quelques condensateurs de stabilisation.

Le capteur de température est matérialisé par le composant IC2, portant la référence LM 335. Cet élément de précision consiste en une sorte de diode zener, dont la tension de sortie est proportionnelle à la température absolue en degrés Kelvin. La pente de ce composant est exactement de 10 mV par degré K, ce qui facilite la conversion directe chaleur en volts.

Le capteur LM...

On trouve sur le marché plusieurs versions de ce capteur :
→ LM 135 : plage de mesure -55 °C à +150 °C, trop couteux et inutile pour notre application.
→ LM 235 : plage de mesure -40 °C à +125 °C.
→ LM 335 : plage de mesure -40 °C à +100 °C, cout abordable, idéal pour notre montage.
C'est d'ailleurs le modèle le plus courant, qui se présente sous la forme d'un petit transistor en boîtier plastique taille TO 92



Automatisme de la trappe

Notre sonde LM 335 est donc alimentée sous une tension de 9 volts à travers la résistance R3. L'élément ajustable P2 permettra éventuellement d'affiner la précision de la mesure lors de l'étalonnage final. Rien de plus simple encore que de faire appel à un étage comparateur de tension, en l'occurrence IC3 sur notre schéma, un classique AOP 741 en boitier DIP 8. Nous allons comparer la tension délivrée par le capteur (broche 3) à celle produite par un pont diviseur réglable (broche 2). Sachant que le zéro absolu en Kelvin débute à -273 degrés, pour une température de l'ordre de 25 °C, la tension de sortie du capteur vaudra donc :

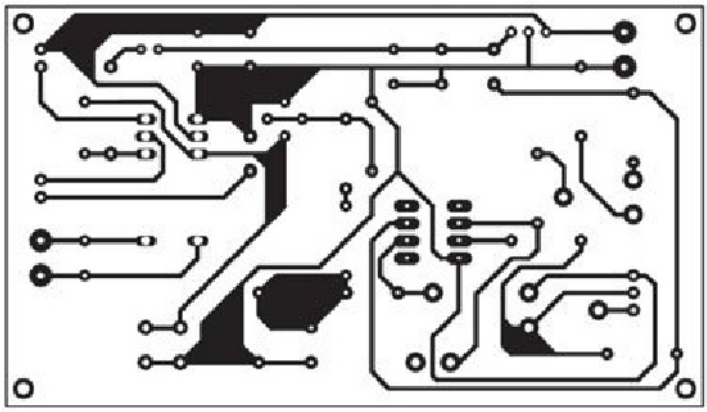
U out = 273 x 10mV + 25 x 10 mV

= 2730 + 250 = 2980 mV = 2,98 volts arrondi à 3 V.

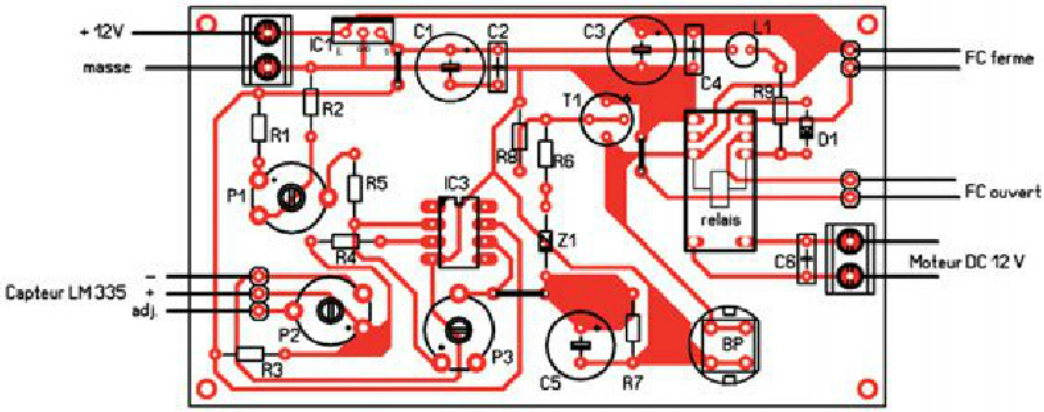
Il convient donc d'obtenir à mi-course de l'ajustable P1 une tension de cet ordre afin de fixer notre seuil de basculement. Si la tension sur l'entrée 3 (broche + non inverseuse) est supérieure à celle présente sur l'entrée 2 (broche – inverseuse) la sortie *out* ou broche 6 de notre AOP bascule immédiatement vers la tension d'alimentation positive, c'est-à-dire un

peu moins de 9 volts. Pour éviter une « hésitation » de l'état de la sortie, et donc des oscillations répétées lorsque les tensions sont presque égales, nous avons ajouté l'ajustable P3 créant une sorte d'hystérésis qui permet un basculement franc et net entre haut et bas. Le condensateur C5 associé à R7 introduit une pseudo-temporisation améliorant la fiabilité de l'ensemble.

À travers la diode zener Z1 et la résistance R6, une température supérieure à 25 °C permet la commande du transistor T1, chargé à son tour de mettre sous tension la bobine du petit relais inverseur. La tension de sa bobine n'est que de 6 volts, la mise en série d'une diode led L1 et de la faible résistance R9 permet une alimentation sous les 9 volts de la source. La diode D1 absorbe les surtensions éventuelles à la coupure forcément selfique de la bobine par le transistor, et évite donc la destruction par claquage de ce dernier. Le poussoir BP a été prévu simplement pour tester le fonctionnement du relais et de ses contacts. Comme le sens de rotation d'un moteur à courant continu dépend des polarités appliquées sur son induit (l'inducteur est ici un aimant permanent), il est clair que les contacts du relais se chargent d'inverser la source, donc le sens de rotation du moto-réducteur. Au repos, sous 25 °C, la trappe est fermée, et le fin de course correspondant se doit d'être actionné, et donc sera ouvert. Lorsque le relais est activé, ses contacts alimentent le moteur à travers cette fois le FC ouvert, pas encore actionné donc passant, mais qui le sera par la trappe ouverte. Et ainsi de suite.

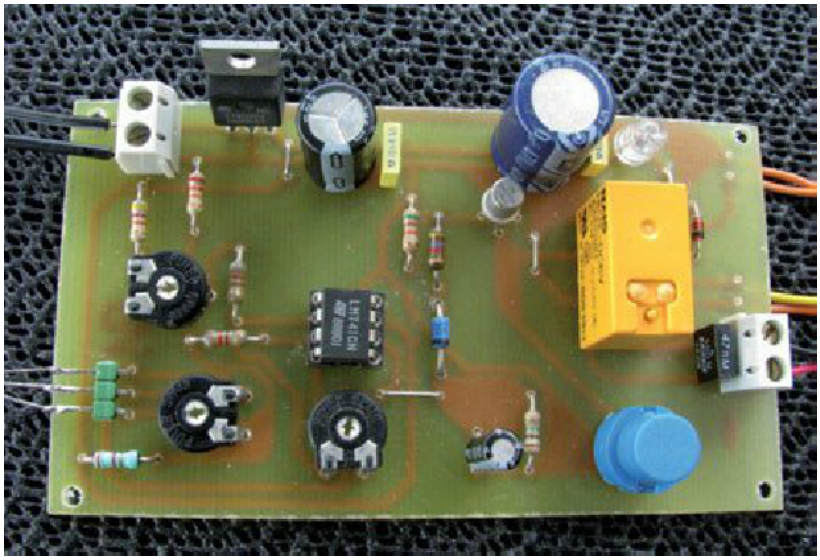


Cuivre automatisme de trappe (97 x 56 mm)



Composants automatisme de trappe

Lors de la mise au point, on devra au préalable appliquer la tension de consigne souhaitée sur la broche 2 du circuit en manœuvrant P1. Les éléments P2 et P3 peuvent être positionnés à mi-course. Le basculement du relais doit être franc, après l'allumage progressif de la led L1. Une grande attention sera portée à la mise sous tension initiale du moteur, qui doit tourner dans le bon sens, sous peine de destruction de l'axe ou d'une fin de course ! Procédez par brèves impulsions et inversez les fils aux bornes du moteur si nécessaire.
La trappe ainsi motorisée devrait fidèlement mettre en service automatiquement votre capteur thermique même en votre absence, à chaque fois que la chaleur produite est suffisante. Cela évitera tout refroidissement nocturne de la pièce ou fonctionnement inutile de vos convecteurs. Nous avons donc solutionné là un inconvénient majeur de ce type d'application solaire.



Circuit automatisation trappe

Aspect définitif de la trappe motorisée

Liste des composants trappe

Semi-conducteurs :

IC1 = régulateur intégré 9 volts positif, 7809, boitier TO 220
IC2 = capteur de température LM 335, boitier TO 92
IC3 = ampli opérationnel µA 741, boitier DIP 8
Z1 = diode zener 3,9 ou 4,7 volts
T1 = transistor NPN 2N 2222
L1 = diode électroluminescente rouge, Ø 5 mm
D1 = diode commutation 1N 4148

Résistances (toutes valeurs 1/4 de watt) :

R1 = 47 KΩ
R2 = 22 KΩ
R3 = 3,9 KΩ
R4, R5 = 820 Ω
R6 = 4,7 KΩ
R7 = 1 MΩ
R8 = 51 KΩ
R9 = 10 Ω ou strap selon couleur de la led L1
P1, P2 = ajustable horizontal, pas 2,54mm 10 KΩ
P3 = ajustable horizontal, pas 2,54mm 1 MΩ

Condensateurs :

C1 = chimique vertical 220 µF/25 V
C2 = plastique 10 nF
C3 = chimique vertical 470 µF/25 V
C4 = plastique 4,7 nF
C5 = chimique vertical 4,7 µF/25 V
C6 = plastique 47 nF

Divers :

Support à souder DIP 8, broches tulipe
2 blocs de 2 bornes vissés soudés, pas de 5 mm
Poussoir miniature pour C.I. (facultatif)
Relais DIL 16, 2 contacts inverseurs, bobine 6 volts
2 fins de course inverseurs à galet
Motoréducteur 12 volts (voir texte)
Picots à souder, fils souples

Centrale à microcontrôleur

Bloc secteur réglable

En fait, cette ultime réalisation « haut de gamme » regroupe quasiment toutes les commandes précédemment décrites. Grâce à la souplesse d'un microcontrôleur, on pourra disposer d'un véritable tableau de pilotage, avec affichage sur écran à cristaux liquides de l'état de l'ensemble du capteur : mise sous tension de la partie électronique, gestion hivernale ou estivale, affichage en clair de la température d'air chaud dans le capteur, commande aisée de la vitesse du ventilateur et affichage de celle ci, asservissement total de l'ouverture et de la fermeture de la trappe selon une température prédéfinie, et signalisation de son état par deux voyants. L'ensemble sera alimenté sous une tension de 12 volts continus pour éventuellement faire appel à une source photovoltaïque et rendre ainsi l'insolateur totalement autonome. Dans un premier temps, il est simple et économique de faire usage d'un petit bloc secteur délivrant une puissance suffisante sous la tension requise :
Que l'utilisation d'un composant programmable ne vous effraie pas, car il s'agit là d'un circuit particulièrement aisé à mettre en œuvre et peu onéreux. Il s'agit certes d'un modèle déjà ancien, à savoir le célèbre circuit Pic Basic PB-3B du coréen Comfile, mais toujours distribué par Lextronic. Le langage de programmation est un Basic facilement compréhensible, grâce notamment à une documentation complète en français. À signaler que le logiciel nécessaire est disponible gratuitement par téléchargement et pourra fonctionner sur des systèmes d'exploitation jusqu'à Win 7. (Mais XP seulement pour le transfert des codes du programme dans la mémoire flash du µP, faute d'un cordon adapté à WIN 7).
Nous avons déjà eu l'occasion de rédiger un ouvrage d'initiation sur ce produit chez DUNOD, collection ETSF, sous le titre « S'initier à la programmation des Pic BASIC », première édition en 2005.

Avis aux lecteurs

Nous ne détaillerons pas ici toutes les subtilités de l'utilisation de ce microcontrôleur, mais sachez simplement que ce sont les lignes du programme qui déterminent si une broche se doit d'être considérée comme une entrée ou plutôt comme une sortie ; d'ailleurs elles sont repérées I/O comme In/Out suivi d'un repère. Certaines broches d'ailleurs ont des propriétés spécifiques que nous exploiterons plus loin. Nous ne saurions que trop vous conseiller de visiter le site de Lextronic qui donne de nombreux exemples et conseils sur ce produit : www.lextronic.fr.

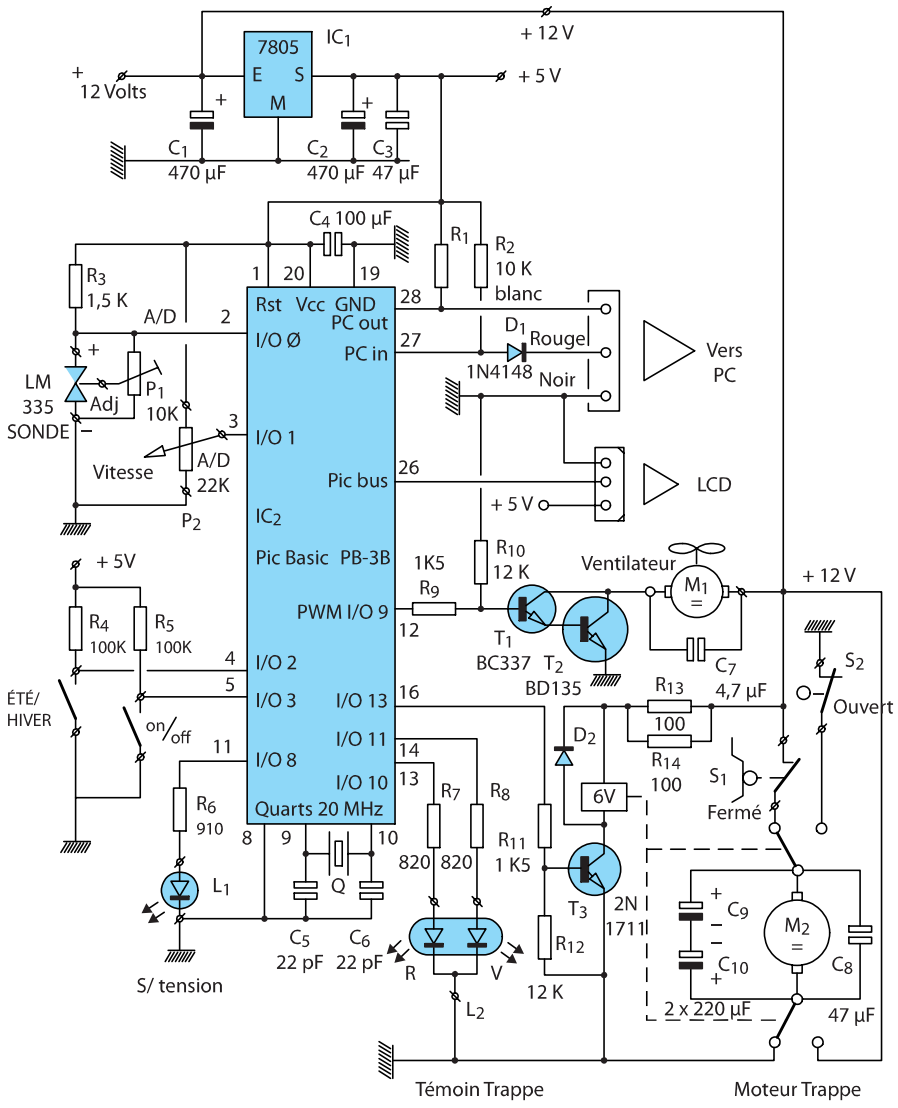


Schéma à Pic Basic

Le schéma proposé sur la figure ci-dessus laisse entrevoir un volumineux composant central (IC2), gérant à la fois toutes les entrées des commandes ainsi que les diverses sorties utiles.

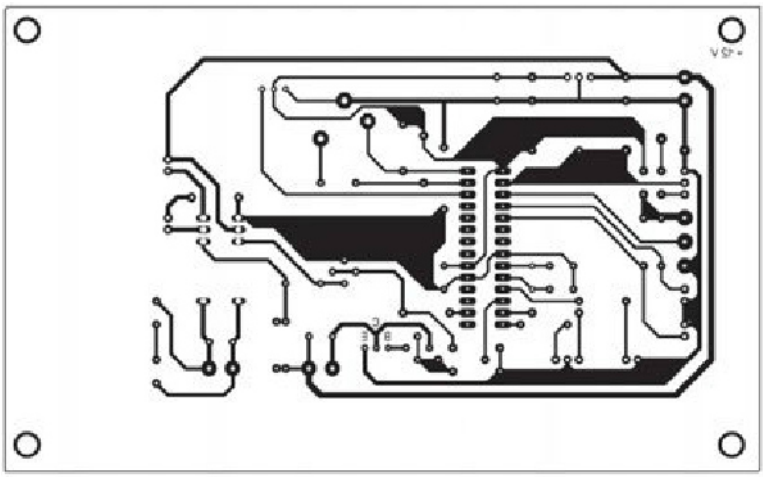
Ce circuit en boîtier DIL de 28 broches sera alimenté obligatoirement sous une tension filtrée de 5 volts. Il est animé par un quartz de 20 Mhz, avec les deux condensateurs C5 et C6. Les broches 27 et 28 sont destinées à la programmation du circuit intégré, à l'aide d'un petit cordon spécifique.

Contentons-nous de faire le tour des divers éléments raccordés au circuit PB-3B, sachant que le programme complet présenté plus loin, sera largement commenté, et que son architecture pourra être comprise à l'aide de l'organigramme de la page 108.

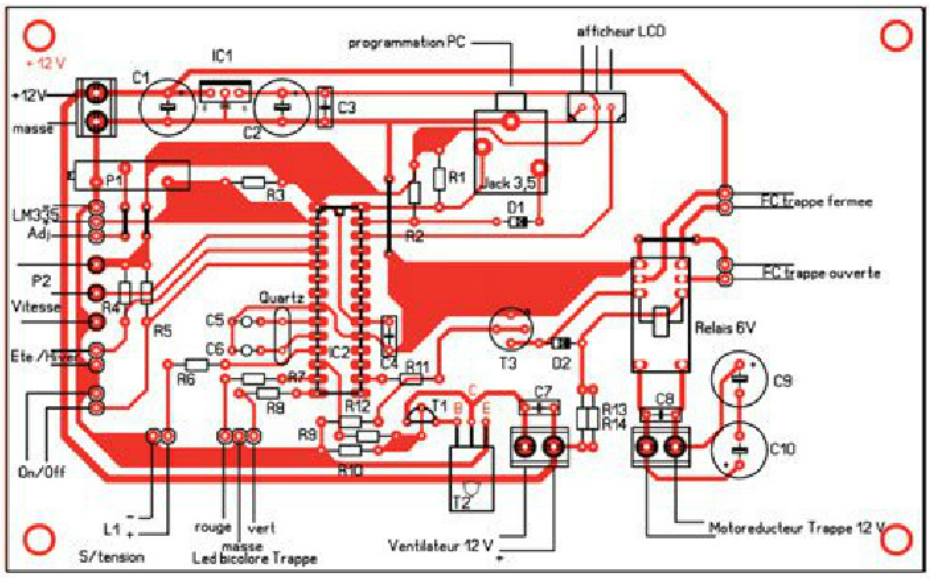
- La température sera mesurée à l'aide du petit capteur LM 335, déjà utilisé précédemment dans le schéma de la figure page 99, pour l'automatisme de la trappe. La valeur analogique en millivolts est appliquée sur la broche I/O 0, capable d'opérer une conversion analogique-numérique sur 10 bits, indispensable pour l'exploitation par le programme Basic.

● La vitesse du ventilateur est déterminée par la position du potentiomètre P2, relié sur l'entrée A/D de la broche 3.
● Deux interrupteurs simples seront utiles pour réaliser la mise sous tension du composant (broche 5) et pour la sélection été/hiver sur la broche 4. Précisons que la position estivale ne permet que la commande du ventilateur tandis que la trappe est maintenue fermée.
● La led jaune L1 assure la visualisation de la mise sous tension, tandis que la led bicolore L2 est chargée de signaler en rouge la trappe fermée (et la présence du secteur) alors que la led en vert témoigne de l'ouverture de la trappe (en hiver et si plus de 25 °C dans le capteur).
● Le ventilateur est relié par l'intermédiaire d'un petit étage Darlington à la broche 12, qui dispose d'un mode de commande logiciel de type PWM. À signaler que ce moteur sera alimenté sous une tension maximale de 12 volts.
● Enfin, le relais qui pilote le motoréducteur de la trappe est actionné à partir de la broche 16, à l'aide du seul transistor T3.
Le reste du schéma des contacts du relais et des deux fins de course est strictement similaire aux liaisons du schéma donné page 99. On peut toutefois remarquer aux bornes de ce dernier moteur, les deux condensateurs chimiques C9 et C10 de forte valeur, reliés en série et en opposition des polarités. Bizarre ? Non, car la mise en marche de ce moteur occasionne des anomalies sur l'affichage LCD et des battements fort désagréables du relais. Cette astuce permet de disposer d'une forte réserve de tension, mais en raison de l'inversion du sens de marche, nous ne pouvions faire appel à un seul condensateur de forte valeur, donc chimique et polarisé ! Le résultat est satisfaisant même si la solution préconisée peut sembler douteuse !
→ La broche 26, nommée PicBus, est réservée à la commande série du bloc afficheur Comfile, de 2 lignes à 16 caractères.
Des modèles plus grands, rétro-éclairés ou non, existent, mais nous ne perdons pas de vue les économies d'énergie en prévision d'une future alimentation photovoltaïque.
On trouvera sur la figure de la page suivante (Platine à microcontrôleur) le tracé des pistes de cuivre de la carte spécialement taillée pour prendre place dans le fond d'un petit coffret Velleman, type G1183.

Afficheur
ELCD 162



Platine à microcontrôleur (dimensions 165 x 98 mm)



Composants

Microcontrôleur Pic Basic

Face avant coffret

Il est fortement conseillé d'approvisionner les divers composants avant de valider la gravure du circuit que nous proposons. Quelques liaisons en fils souples seront utiles pour rejoindre la face avant du coffret retenu, qui a d'ailleurs fort belle allure, nous semble-t-il.

Liste des composants

Semi-conducteurs :

IC1 = régulateur intégré 5 volts positif, 7805, boitier TO 220
IC2 = microcontrôleur Pic Basic, modèle PB-3B de COMFILE, boitier DIL 28 étroit
Afficheur à cristaux liquides COMFILE, 2 lignes 16 caractères, modèle ELCD 162
Sonde de température LM 335
T1 = transistor NPN BC 337
T2 = transistor NPN de puissance BD 135
T3 = transistor NPN 2N 2222 ou 2N 1711
L1 = diode électroluminescente Ø 5 mm, jaune
L2 = diode électroluminescente bicolore Ø 5 mm, rouge –vert
D1, D2 = diode commutation 1N 4148

Résistances (toutes valeurs ¼ de W) :

R1, R2 = 10 KΩ
R3 = 1,5 KΩ
R4, R5 = 100 KΩ
R6 = 910 Ω
R7, R8 = 820 Ω
R9, R11 = 1,5 KΩ
R10, R12 = 12 KΩ
R13, R14 = 100 Ω
P1 = ajustable multitours 10 KΩ
P2 = potentiomètre + bouton, courbe A, 22 KΩ

Condensateurs :

C1, C2 = chimique vertical 470 µF / 25 V
C3 = plastique 47 nF
C4 = plastique 100 nF
C5, C6 = céramique 22 pF
C7 = plastique 4,7 nF
C8 = plastique 47 nF
C9, C10 = chimique vertical 2200 µF / 25 V

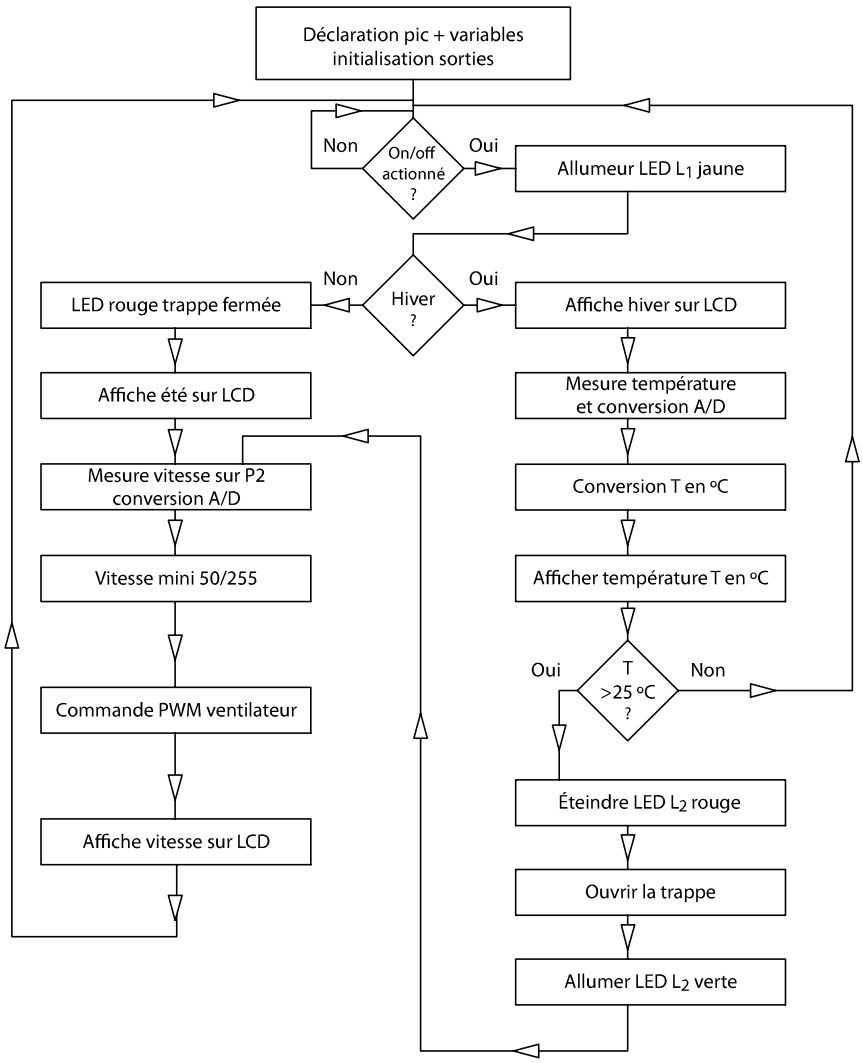
Divers :

Support à souder DIL 28 étroit ou 2 X DIL 14, broches tulipes
3 blocs de 2 bornes vissé soudé, pas de 5 mm
Connecteur à souder, jack stéréo 3,5 mm
Connecteur 3 broches détrompé pour afficheur LCD (Lextronic)
Quartz à fils 20 Mhz
Relais DIL 16, 2 contacts inverseurs, bobine 6 volts
2 inters simples
Picots à wrapper, pas de 2,54 mm
Fils souples multicolores
Boîtier plastique Velleman type G1183 (189 x134 x 32/54 mm)
3 supports de led 5 mm
Prévoir motoréducteur 12 V, 2 fins de course, ventilateur 12 V silencieux
Bloc d'alimentation 12 V continu

La programmation

Il serait très utile de prendre connaissance au préalable de l'organigramme ci-dessous, puisqu'il représente exactement la démarche suivie pour rédiger le programme en Basic, donné un peu plus loin. Dans le tableau suivant, on trouvera le nom des variables utilisées et le numéro des entrées/sorties correspondantes.

Variable programme ou schéma	Grandeur ou fonction	Entrée/sortie Avec indice	Remarque
T	Température	I/O 0	Conversion A/N
V	Vitesse	I/O 1	Conversion A /N
H	Eté/hiver	I/O 2	Entrée
X	On/off	I/O 3	Entrée
L1	Led S/tension	I/O 8	Sortie
L2	Led rouge trappe fermée	I/O 10	Sortie
	Led verte trappe ouverte	I/O 11	Sortie
M1	Ventilateur	I/O 9	Modulation PWM
M2	Relais trappe	I/O 13	Sortie



Organigramme du programme Basic

Et les lignes du programme Basic finalement chargées dans la mémoire du Pic Basic :

‘SOLAIRE Eyrolles, juin 2011

```
CONST DEVICE = 3B                    ‘déclaration du PIC PB-3B
DIM X as BYTE, H as BYTE             ‘déclaration variables (de 0 à 255)
DIM T as INTEGER, V as INTEGER       ‘déclaration variables (de 0 à 65535)
DEB:    OUT 8,0 :PWMOFF 9 : OUT 9,0 :OUT 10,1      ‘initialisation des sorties
   OUT 11,0 : OUT 13,0
   LCDINIT:CLS :CSROFF               ‘initialisation de l’afficheur LCD
OFF:    X = KEYIN(3,25)              ‘ON/OFF actionné ?
   IF X = 0 THEN GOTO SUI ELSE GOTO DEB
SUI:    OUT 8,1                      ‘led jaune Sous-tension allumée
   H = KEYIN(2,25)                   ‘position Eté ou Hiver ?
   IF H = 0 THEN GOTO ETE ELSE GOTO HIV
HIV:    LOCATE 0,0 : PRINT»HIVER»          ‘afficher «HIVER» sur pavé LCD
   T = ADIN(0)                       ‘mesure température sur LM 335 en °K
   T = (T*50)/102                    ‘conversion A/D et mise en forme
   T = T - 273                       ‘conversion en degrés C
   LOCATE 7,0 :PRINT DEC(T,2,0):PRINT» deg.C»         ‘afficher température air chaud
   IF T > 25 THEN GOTO SOL           ‘seuil mini d’ouverture fixé à 25 °C
   DELAY 2000                        ‘temporisation 2 secondes
   GOTO DEB
SOL:    GOSUB VEN                    ‘branchement sous-programme Ventilateur
   LOCATE 0,1:PRINT»Vit.»:PRINT DEC(V):PRINT»/255»
                                     ‘afficher vitesse ventilateur de 50 à 255
   OUT 10,0 : OUT 11,1 : OUT 13,1    ‘ouverture trappe et signalisation led rouge
   DELAY 2000
   GOTO OFF
ETE:    LOCATE 0,0 : PRINT»ETE Ventilation» ‘sous-programme   ETE ventilation
   GOSUB VEN
   LOCATE 0,1:PRINT»Vit.»:PRINT DEC(V):PRINT»/255»
                                     ‘afficher vitesse ventilateur de 50 à 255
   DELAY 3000
   GOTO DEB
VEN:    V = ADIN(1)                  ‘consigne vitesse sur potentiomètre P2
   V = V/4                           ‘conversion A/D et mise en forme pour PWM
   IF V < 50 THEN V = 50             ‘vitesse mini fixée à 50/ 255
   PWM 9,V                           ‘commande ventilateur PWM
   RETURN
```

À propos d'une alimentation photovoltaïque…

Il n'est évidemment pas question ici d'autoconstruction, si vous optez pour une autonomie totale, couvrant la faible puissance électrique nécessaire, il vous faudra acquérir et associer les éléments constitutifs. C'est surtout la consommation du ventilateur qui déterminera la puissance totale à pourvoir. À titre indicatif, un modèle présenté affichait 1,1 W seulement, et le bloc secteur utilisé délivrait une puissance de 11 W (voir ci-contre).
Un système photovoltaïque se compose de trois éléments distincts.

Le panneau solaire

Exposé au soleil ou photo générateur, il est constitué de nombreux modules élémentaires ou cellules de 0,6 volt, associés en série pour parvenir à atteindre une tension utile de 12 volts continus.
La mise en parallèle des cellules permettra d'augmenter l'ampérage, donc la puissance maximale disponible. Le silicium cristallin (mono ou poly…) représente la plus grosse part du marché, avec un rendement de 12 à 18 %. Le silicium amorphe, plus économique à l'achat, présente un rendement nettement inférieur. Un panneau d'une puissance de 5 à 10 watts devrait constituer une valeur suffisante pour notre application.

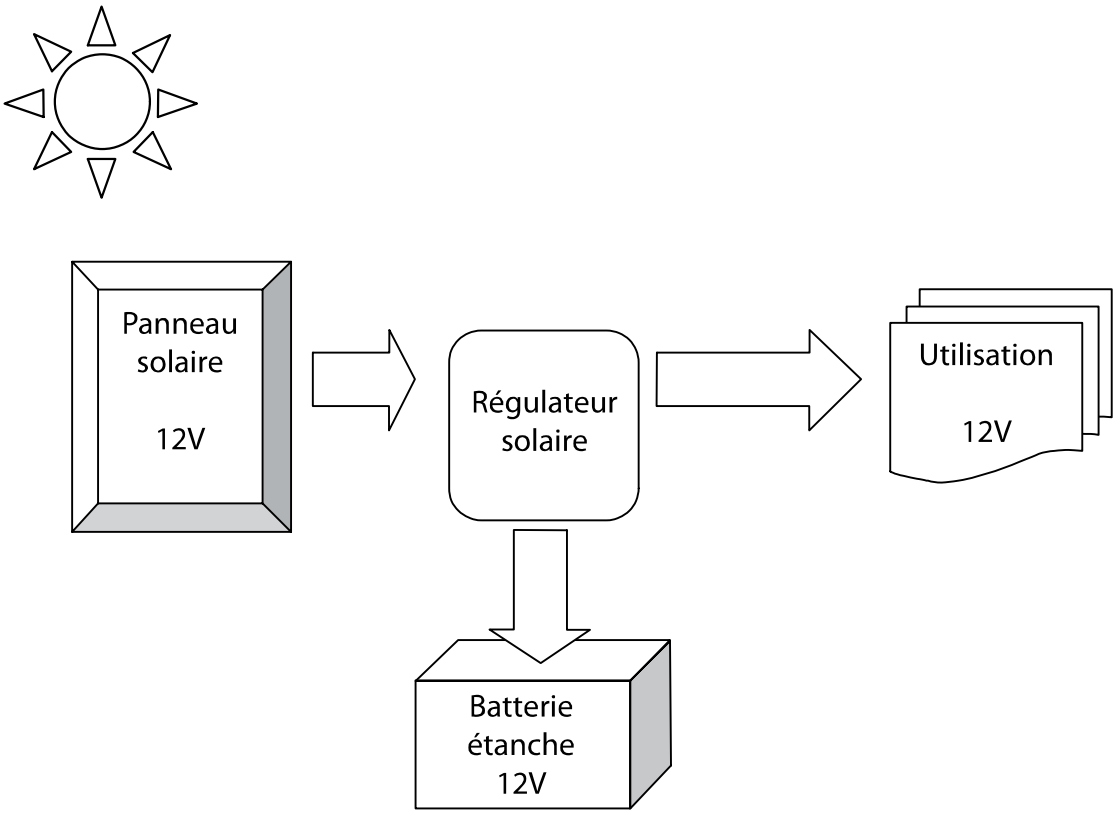
La batterie

Celle-ci est indispensable pour stocker l'énergie produite et délivrer une alimentation ininterrompue lorsque le soleil fait défaut (il faut noter que dans ce cas la trappe sera sans doute fermée et le ventilateur arrêté). Un modèle de batterie étanche et sans entretien est conseillé, sachant qu'il existe des modèles spéciaux destinés aux applications solaires.

Le régulateur de charge solaire

Il est destiné à protéger la batterie contre les surcharges sous un fort ensoleillement, mais également à éviter la décharge profonde des éléments accumulateurs et prolonger leur durée de vie. Il délivrera une tension continue stable de 12 volts pour tous nos modules électroniques, prévus justement pour fonctionner sous cette tension unique.

Voici la présentation d'un ensemble PV complet :



On trouvera aisément dans le commerce des distributeurs capables de vous conseiller et vous fournir un ensemble PV correctement dimensionné.

3

PARTIE

ANNEXES

Les bonnes adresses

Les liens utiles

- Ademe, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
  www.ademe.fr
- INES, Institut national de l'énergie solaire
  www.ines-solaire.org
- CLER, Comité de liaison énergies renouvelables
  www.cler.org
- Outils solaires, énergie solaire dans l'habitat
  www.outilssolaires.com
- APPER Solaire, le Solaire à la portée de tous
  www.apper-solaire.org
- Héliodôme, maison solaire ultime
  www.heliodome.com
- Polycarbonate alvéolaire
  www.polycarbonate-et-veranda.com
- Macocco, vitrages
  www.macocco.com
- Glassgo, vitrages
  www.sos-glassgo.fr
- Pourpre, le monde de la couleur
  www.pourpre.com
- Cartes, toutes les cartes de France
  www.cartesfrance.fr
- Économie, cartes solaires
  www.econologie.com

Les fournisseurs de matériels…

- Ardoisières d'Angers, carrière d'ardoises
  www.ardoise-angers.fr
- Obser'ver, observatoire des énergies renouvelables
  www.energies-renouvelables.org
- J.L. Perrier, informations diverses
  http://m.you.free.fr
- Solarwall, technologie air chauffé
  www.solarwall.com
- Portail solaire, annuaire de l'énergie solaire en France
  www.portail-solaire.com
- Buildit solar, auto constructions solaires
  www.builditsolar.com
- Retscreen, solaire à air au Canada
  www.retscreen.net
- Scierie Retif, bois Douglas
  www.scierie-retif.com
- Lextronic
  www.lextronic.fr
- Selectronic
  www.selectronic.fr
- Conrad
  www.conrad.fr
- Velleman
  www.velleman.eu
- Service public, déclaration de travaux
  www.servicepublic.fr
- Thermoslate, toitures thermiques eau + ardoises
  www.thermoslate.com
- Portail Météo
  www.meteo.fr

Bibliographie

Installer un chauffage ou un chauffe-eau solaire, Éditions Eyrolles, 2008.
Produire son électricité, Éditions Ulmer, 2008.
Énergie solaire, J.-L. Perrier (sans doute épuisé), Éditions ETSF 1979.
S'initier à la programmation des Picbasic, Éditions ETSF, 2005.

Dans la même collection, aux Éditions Eyrolles

Construire sa terrasse en bois, G12717, 2010.
Se chauffer au bois, G12810, 2010
Les fours solaires, G13369, 2012
Petit éolien et raccordement au réseau, à paraître.

Index

A

absorbeur, 39, 42
aérothermie, 35
air
composition, 31
albédo, 84
ardoise, 40, 41, 44

B

brise-soleil, 84

C

capteur, 56
orientation, 49
coefficient d'absorption, 38
Constante solaire, 32
corps noir, 42

E

éclairement
carte de France, 34
effet de serre, 33, 39
énergie solaire, 14
ensoleillement, 26

F

fluide caloporteur, 48

G

gaz, 13, 32
gestion
électronique, 86
estivale, 79

I

inclinaison *Voir aussi* latitude
irradiation solaire, 34

L

latitude, 26, 28

P

pertes thermiques, 38
protection solaire, 81,
Voir aussi brise-soleil

R

rafraîchissement, 85
rayonnements, 32

S

Saussure (Horace-Bénédict de), 22, 35
solarimètre, 17, 34, 86, 87, 88, 89, 90
spectre visible, 32

T

température
élévation de, 38

V

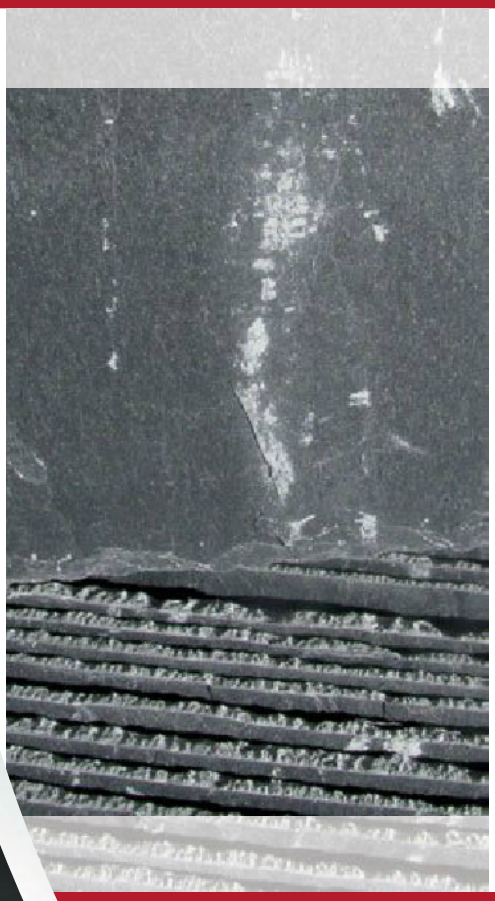
vitrage, 16, 22, 23, 36, 37, 39, 42, 44, 45, 46, 47, 49, 54, 56, 59, 63, 64, 75, 76, 77, 80, 84, 89

Offrez-vous quelques degrés de plus !

L'aérothermie solaire directe consiste à chauffer l'air de nos maisons. Cette technique est particulièrement simple, fiable et facile à mettre en œuvre par tous, et sans connaissances particulières ! Même les habitations anciennes, résidences secondaires ou lieux isolés en bénéficieront ! Cette application solaire passive, encore trop méconnue ou délaissée, est fort économique à réaliser, insensible aux aléas climatiques, d'une durée de vie très importante, et ne faisant appel qu'à des constituants solides et naturels.

Cet ouvrage vous dévoile pas à pas, après quelques notions théoriques, les étapes très détaillées de la construction des capteurs à air. De nombreuses photos vous permettront de comprendre leur réalisation, leur installation sur votre façade, et même, en prime, leur gestion électronique pour une énergie solaire enfin maîtrisée !

Illustrations de couverture © Guy Isabel



Au programme...

Le principe : collecter les calories solaires par effet de serre dans un absorbeur en ardoises, et produire ainsi dans la journée une énergie calorifique gratuite, en soulageant d'une manière importante et automatique votre chauffage traditionnel.

Code G13403
ISBN 978-2-212-13403-2
www.editions-eyrolles.com